

# **Untersuchung der kognitiven Modellierung zur Gussstückqualitäts- verbesserung**

Der Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik  
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

eingereichte

## **DISSERTATION**

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.),

vorgelegt

von MSc. Irina Polyakova

geboren am 1. Juli 1983 in Wolgograd

Gutachter.: Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Bast, Freiberg

Prof. Dr.-Ing. Valery Kamaev, Wolgograd

Prof. Dr.-Ing. Georg Bretthauer, Karlsruhe

Freiberg, den 17.07.2013

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>Teil 1. Gussqualität und Methoden zur Verbesserung</b>	<b>7</b>
<b>1.1. Qualitätsmanagement</b>	<b>7</b>
1.1.1. Sieben elementare Qualitätstechniken	11
1.1.2. FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse)	17
1.1.3. Statistische Methoden der Prozessregelung	17
1.1.4. Experten-Methoden	18
<b>1.2. Qualität in der Gießerei</b>	<b>18</b>
1.2.1. Gussstückqualität	18
1.2.2. Methoden zur Gussstückqualitätsverbesserung	19
1.2.3. Problemklassifizierung	21
1.2.4. Gussstückqualität als kompliziertes schwach strukturiertes System	24
1.2.5. Entscheidungsunterstützungssysteme	24
<b>Teil 2. Anwendung der kognitive Modellierung</b>	<b>31</b>
<b>2.1. Entwicklung der kognitiven Karten</b>	<b>31</b>
2.1.1. Klassische kognitive Karte	31
2.1.2. Andere Modifikationen der kognitiven Karten	35
2.1.3. Weitere Entwicklung	37
<b>2.2. Entwicklungsmethodik, Simulation und Analyse eines kognitiven Modells zur Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehlern</b>	<b>38</b>
2.2.1. Modellbildung einer Situation	40
2.2.2. Analyse des Fachgebiets	40
2.2.3. Ermittlung der Faktorengruppen und Faktoren	42
2.2.4. Definition der Faktorentypen	43
2.2.5. Definition der Maßeinheiten und Anfangswerte der Faktoren	47
2.2.6. Verbindungen zwischen den Faktoren	47
2.2.7. Verifizierung des Modells	49
2.2.8. Vorbereitung der Szenarien für die Simulation	50
2.2.9. Selbstentwicklung des Modells	51
2.2.10. Gesteuerte Entwicklung	54
2.2.11. Analysenwerkzeuge	55

<b>Teil 3.</b>	<b>Erarbeitung eines automatisierten Entscheidungsunterstützungssystems auf der Basis kognitiver Karten</b>	<b>65</b>
<b>3.1.</b>	<b>Anforderungen an das automatisierte Entscheidungsunterstützungssystems auf der Basis kognitiver Karten</b>	<b>65</b>
<b>3.2.</b>	<b>Architektur des Systems</b>	<b>66</b>
<b>3.3.</b>	<b>Struktur der Modelldatei</b>	<b>67</b>
<b>3.4.</b>	<b>Struktur der Wissensbasis</b>	<b>69</b>
<b>3.5.</b>	<b>Beschreibung der Subsysteme</b>	<b>70</b>
<b>3.6.</b>	<b>Entwicklung des Systeminterface</b>	<b>74</b>
<b>3.7.</b>	<b>Arbeitsvarianten mit dem System</b>	<b>83</b>
<b>Teil 4.</b>	<b>Simulation mit Hilfe des kognitiven Modells zur die Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehlern</b>	<b>84</b>
<b>4.1.</b>	<b>Beschreibung des Gussstückes</b>	<b>84</b>
<b>4.2.</b>	<b>Anfangsbedingungen</b>	<b>85</b>
<b>4.3.</b>	<b>Vorbereitung des Modells zur Simulation</b>	<b>90</b>
4.3.1.	Zielfaktoren	90
4.3.2.	Steuerfaktoren	90
4.3.3.	Prozessfaktoren	91
<b>4.4.</b>	<b>Verifizierung des Modells</b>	<b>92</b>
<b>4.5.</b>	<b>Gesteuerte Entwicklung</b>	<b>94</b>
4.5.1.	Szenarium Gießtemperatur	95
4.5.2.	Szenarium Kokillentemperatur	96
4.5.3.	Gießzeit/Querschnitt des Eingussystems	98
4.5.4.	1. kombiniertes Szenarium	100
4.5.5.	2. kombiniertes Szenarium	102
4.5.6.	Szenarium Kompetenz des Personals	104
<b>4.6.</b>	<b>Effizienz der Szenarien</b>	<b>106</b>
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>110</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>118</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>120</b>
	<b>Formelverzeichnis</b>	<b>122</b>

## Einleitung

Das Gießen von Metallen hat eine jahrtausendealte Tradition. Das Produktionsvolumen von Gussstücken nimmt jedes Jahr zu. Gleichzeitig steigen auch die Anforderungen an die Gussstückqualität. Andererseits zeigt aber die Realität, dass eine permanent fehlerfreie Gussproduktion oft nicht möglich ist. Beim Vertragsabschluss wird es vereinbart, welche z. B. mechanische Eigenschaften das Gussteil besitzen muss und wie viel Prozent Toleranz zugelassen sind. In der Regel geht das Vorhandensein von Gussfehlern auch mit der Entstehung von Gussausschuss einher. In vielen Gießereien ist eine Ausschussquote von 5% zugelassen.

Vom Gießer werden nicht nur fehlerfreie Gussteile erwartet, sondern solche Teile, die ein bestimmtes Gefüge und entsprechende Eigenschaften aufweisen. Die Gussteile, die den Anforderungen der Kunde nicht gerecht werden, sind minderwertig und unbrauchbar. Da ein qualitätsgerechtes Gussteil alle Anforderungen der Kunde erfüllen muss, darf es keine Gussfehler besitzen. Zur Charakterisierung dieser Zusammenhänge wurden der Begriff „Qualitätssicherung“ und seit 1992 der Oberbegriff „Qualitätsmanagement“ eingeführt.

Die Problematik der ständigen Gussstückqualitätsverbesserung ist auch gegenwärtig immer noch aktuell. Das in der Regel häufige Zusammenwirken mehrerer Einflussfaktoren erschwert oft das sichere Erkennen und Bekämpfen der Qualitätsprobleme und Ausschussursachen. Im System der Gusserzeugung sind die Gussstückqualität und die dazu gehörigen Qualitätsmerkmale von einer großen Zahl von Einflussgrößen abhängig. Die Abhängigkeiten einzelner Qualitätsmerkmale sind in der Regel sehr komplexer Natur, d. h. bestimmte Einflussfaktoren können gegenläufige Wirkungsinintensitäten und komplizierte innere Zusammenhänge besitzen. Manche Faktoren besitzen unter dem Einfluss der anderen Faktoren ein dynamisches Verhalten. Systeme mit derartigen Charakteristika sind in der Wissenschaft bekannt und werden als schwachstrukturierte Systeme bezeichnet (1 S. 41).

Zur Bekämpfung des Gussstückausschusses existiert eine Reihe unterschiedlicher Methoden. Oftmals berücksichtigen diese nur ein einziges Gussfehlerproblem, wobei unzureichend nach den Ursachen geforscht wird, um eine exakte Lösung des Problems abzuleiten. Sehr häufig beobachtet man aber auch Situationen, da die Ursache des Fehlers bereits aus dem Verständnis des Prozesses abgeleitet werden kann.

In letzter Zeit wird versucht, für das Modellieren und die Simulation von komplizierten, schwachstrukturierten Systemen ein Entscheidungsunterstützungssystem basierend auf kognitiven Aspekten zu nutzen.

Die kognitive Arbeitsweise wurde schon bei mehreren schwachstrukturierten Systemen getestet. Unter diesem Blickwinkel kann man dem System eines Gussqualitätsmanagements vergleichbare Eigenschaften zuordnen, so dass die kognitive Modellierung auf diesem Gebiet arbeitsfähig und sehr hilfreich sein sollte.

Die kognitive Methode schafft die Voraussetzungen, den Prozess der Gussfehlerentstehung deutlich und transparent zu machen, das gesamte komplizierte Netz von Gussfehlerursachen und den erforderlichen Maßnahmen für ihre Beseitigung anschaulich darzustellen und rasch die Gruppe von Faktoren eindeutig zu definieren, die für die Gussfehler verantwortlich sind.

Das Ziel der Dissertation besteht in der Verbesserung der Effizienz der Managemententscheidungen für die Qualitätsverbesserung und Gussausschussverringerung in den Gießereien mittels eines Entscheidungsunterstützungssystems auf der Basis des kognitiven Herangehens.

Zur Erreichung dieses Zieles werden folgende Aufgaben formuliert:

1. Analyse des Gussqualitätsproblems und der modernen Methoden zur Qualitätsverbesserung in der Gießereibranche.
2. Erarbeitung einer Entwicklungsmethodik, Simulation und Analyse eines kognitiven Modells zur Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehlern.
3. Erarbeitung eines automatisierten Entscheidungsunterstützungssystems auf der Basis kognitiver Karten.
4. Durchführung der Simulationsszenarien mit Hilfe des Entscheidungsunterstützungssystems zur Vermeidung von Gussfehlern.

Der innovative Beitrag besteht darin, dass die kognitive Modellierung für ein technisches Gebiet aufbereitet und dass für diesen Einsatzfall neue Software zur rechnerunterstützten Simulation der Gussfehlererkennungs-, Entstehungs- und Vermeidungsprozesse entwickelt werden.

Es wird eine Entwicklungsmethodik, Simulation und Analyse eines kognitiven Modells zur Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehler erarbeitet und verifiziert. Die Verifizierung der Methodik erfolgt durch einen Vergleich der Simulationsergebnisse mit den statistischen Erhebungen einer Aluminiumgießerei. Um ein kognitives Modell simulieren zu können und die Ergeb-

nisse der weiteren Entwicklung zu prognostizieren, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die entsprechende Software auf der Basis der vorgeschlagenen Methodik entwickelt.

Die Arbeit besteht aus vier Hauptteilen. In Teil 1 werden Grundmethoden zur allgemeinen Qualitätsverbesserung und insbesondere in der Gießereibranche behandelt. Das System der Gussstückqualitätsverbesserung wird als schwachstrukturiertes System betrachtet. Für die Entscheidungsunterstützung wird vorgeschlagen, ein neues Entscheidungsunterstützungssystem zu entwickeln, das auf einer kognitiven Herangehensweise und den gewählten Qualitätstechniken basiert.

In Teil 2 wird beschrieben, wie mit Hilfe der kognitiven Simulation eine Wichtung der einzelnen Einflussfaktoren auf die Endqualität dechiffriert werden kann. Nach einer Analyse der Entwicklungsgeschichte werden in diesem Teil auch die Entwicklungsmethodik und die rechentechnische Simulation der kognitiven Karten zu den Gussstückqualitätsproblemen dargestellt. In dieser Methodik werden einige Techniken für die Analyse der kognitiven Karten sowie deren mathematischer Apparat vorgelegt. Dabei sollen die notwendigen Algorithmen der kognitiven Simulation für das Problem des Qualitätsmanagementsystems adaptiert werden.

Die erarbeitete Methodik wird in ein lauffähiges Rechnerprogramm programmiert, um die Voraussetzungen für eine Simulation des Qualitätszustands je nach den Bedingungen auf einem Computer zu schaffen. In Teil 3 werden die Voraussetzungen zur Entwicklung eines Rechnerprogramms für das Entscheidungsunterstützungssystem basierend auf einem kognitiven Herangehen formuliert.

Die erarbeitete Methodik soll durch die Simulation des Qualitätszustands unter verschiedenen Anfangsbedingungen und Steuerungen in einem entwickelten Steuerprogramm verifiziert und geprüft werden. In Teil 4 werden virtuelle Experimente der verschiedenen Szenarien zur Gussstückqualitätsverbesserung durchgeführt.

Nach der Verifizierung der erarbeiteten Methodik und der Software erlaubt diese Verfahrensweise, dass sie in der Praxis zielgerichtet angewendet werden kann.

## **Teil 1. Gussqualität und Methoden zur Verbesserung**

### **1.1. Qualitätsmanagement**

Um den Begriff Qualitätsmanagement zu verstehen, sollen zunächst der Begriff „Qualität“ geklärt werden. Unter Qualität versteht man das Vermögen einer Gesamtheit inhärenter Merkmale eines Produkts, eines Systems oder eines Prozesses zur Erfüllung von Forderungen der Kunden und anderer interessierten Parteien (2).

Auf Grund mangelnder Qualität wird das Produkt zurückgeliefert, und das bedeutet für das Unternehmen, dass der Kunde unzufrieden ist, er sucht und findet andere Hersteller, die Kapazitätsauslastung und der Gewinn sinken; die Anzahl der Arbeitsplätze wird reduziert. Das heißt, dass der Markt die Hersteller nicht akzeptiert, die den wachsenden Ansprüchen der Kunden nicht gerecht werden können. Die wachsenden Märkte fordern von den Unternehmen einen vergleichbaren Qualitätsstandart auf höchstem Niveau (3).

Beim Vertragsabschluss wird vereinbart, welche z.B. mechanische Eigenschaften das Gussteil besitzen muss und wie viel Prozent Toleranz zugelassen sind. Es wird vom Gießer nicht nur ein fehlerfreies Teil erwartet, sondern ein Teil, das bestimmte Eigenschaften und Gefüge besitzt. Die Gussteile, die die Anforderungen der Kunden nicht erfüllen können, sind minderwertig und unbrauchbar. Das heißt, ein Qualitätsgussteil soll alle Anforderungen der Kunde erfüllen und dementsprechend ohne Gussfehler sein. Dafür wurde der Begriff „Qualitätssicherung“ und seit 1992 den Oberbegriff „Qualitätsmanagement“ vorgeschlagen.

Qualitätsmanagement beinhaltet aufeinander abgestimmte Tätigkeiten zum Leiten und Lenken einer Organisation bezüglich Qualität. Die wichtigsten Tätigkeiten des Qualitätsmanagements nach (4) sind:

1. Qualitätsplanung - Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Festlegen der Qualitätsziele und der notwendigen Ausführungsprozesse sowie der zugehörigen Ressourcen zum Erreichen der Qualitätsziele gerichtet ist.
2. Qualitätslenkung - Teil des Qualitätsmanagements, der auf die Erfüllung von Qualitätsforderungen gerichtet ist.
3. Qualitätssicherung - Teil des Qualitätsmanagements, der auf das Erzeugen von Vertrauen gerichtet ist, dass die Qualitätsforderungen erfüllt werden.

4. Qualitätsverbesserung - Teil des Qualitätsmanagements, der auf die Erhöhung der Eignung zur Erfüllung von Qualitätsanforderungen gerichtet ist.

Qualitätsmanagement umfasst alle Aspekte im Rahmen der Unternehmensführung, die im Zusammenhang mit der von der obersten Leitungsebene formulierten, grundlegenden Einstellung sowie den Absichten, Zielsetzungen und Maßnahmen in Bezug auf die Erreichung und Verbesserung von Qualität stehen. Qualitätsmanagement berücksichtigt dabei weitere Aspekte im Unternehmen, wie Wirtschaftlichkeit, Umweltfragen, Wünsche und Anforderungen der Kunden, vielfältige Einflussfaktoren.

Umfang und Inhalte des Qualitätsmanagements nennt man Qualitätsmanagementsystem. Traditionell wird das Qualitätsmanagementsystem in einem Qualitätsmanagementhandbuch schriftlich formuliert. Der Inhalt soll sich an den einschlägigen Normen orientieren. Die weltweit anerkannten Normen für das Qualitätsmanagementsystem sind die Normen von DIN (Deutsches Institut für Normung), EN (Europäische Normen) und ISO (eng. International Organization for Standardization) (5) (Tabelle 1-1).

DIN EN ISO 9000 Qualitätsmanagement und Qualitätsmanagementnormen Leitfaden zur Auswahl und Anwendung
DIN EN ISO 9004 Qualitätsmanagement und Elemente eines Qualitätsmanagementsystems Leitfaden
DIN EN ISO 9001 Qualitätsmanagementsysteme Modell zur Darlegung des Qualitätsmanagements in Design/Entwicklung, Produktion und Montage, Kundendienst
DIN EN ISO 9002 Qualitätsmanagementsysteme Modell zur Darlegung des Qualitätsmanagements in Produktion und Montage Kundendienst
DIN EN ISO 9003 Qualitätsmanagementsysteme Modell zur Darlegung des Qualitätsmanagements bei der Endprüfung

Tabelle 1-1. Normen zum Qualitätsmanagement nach DIN EN ISO (3)



Nach der Erarbeitung im Unternehmen soll das Qualitätsmanagementsystem durch staatlich geprüfte Stellen wie TÜV Cert, DQS, DEKRA geprüft werden. Wenn das Unternehmen ein funktionsfähiges Qualitätsmanagementsystem hat, wird ein Zertifikat zugewiesen (Abbildung 1-1).



Abbildung 1-1. Beispiel eines Zertifikates (6)

Qualitätsmanagement ist nicht nur das Erlangen des Zertifikats nach DIN EN ISO 9001, sondern ein kontinuierlicher Prozess. Bereits in den 1950ern Jahren formulierte Demming erste Schwerpunkte der kontinuierlichen Qualitätsverbesserung in allen Bereichen des Fertigungsablaufs. Damals wurden erste wichtigste Schritte zum TQM (Total Quality Management) gemacht. Das Zertifikat ist nur ein erster Meilenstein auf dem Weg zu TQM.

Nach DIN ISO 8402 zielt das TQM auf die Mitwirkung aller ihrer Mitglieder basierende Führungsmethode einer Organisation ab, die die Qualität in den Mittelpunkt stellt und die durch Zufriedenstellung der Kunden auf langfristigen Geschäftserfolg sowie Nutzen für die Mitglieder der Organisation und für die Gesellschaft gerichtet ist.

TQM besteht aus zwei Mechanismen: Qualitätssicherung (Quality Assurance), Qualitätsverbesserung (Quality Improvements). Das Prinzip ist gleich dem eines Balls, der nicht von einem geneigten Brett abrutschen darf (Abbildung 1-2).

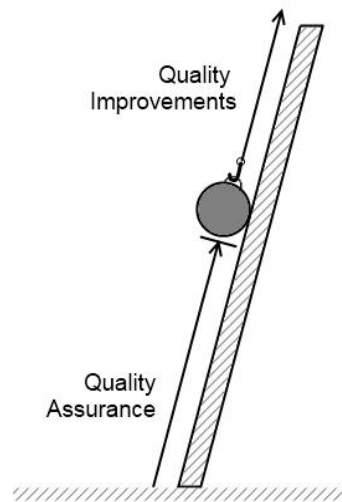


Abbildung 1-2. TQM

Es gibt zwei Möglichkeiten, den Ball fest zu halten: unterstützen von unten oder ziehen von oben. TQM ist, wenn man beides macht, d.h. nicht nur das Unterstützen vorhandener Qualitätsniveaus, sondern sie erhöhen. TQM benötigt die volle Unterstützung aller Mitarbeiter, um zum Erfolg zu kommen. TQM wurde erst in der japanischen Autoindustrie weiterentwickelt und schließlich zum Erfolgsmodell geführt. Die Herangehensweise wurde auch in Europa im EFQM-Modell (European Foundation for Quality Management) für Business-Excellence weiterentwickelt.

Das Total Quality Management ist die Entwicklung, Erweiterung und Unterhaltung der Organisationsstruktur verschiedener Businessprozesse. TQM stützt sich auf strategisches Herangehen, das sich sowohl auf die Aufrechterhaltung des bestehenden Qualitätsniveaus als auch auf eine schrittweise Zunahme einstellt.

In den 1970er Jahren wurde bei Motorola in den USA die neue Methode, benannt als Six Sigma, entwickelt. Im Vergleich zu TQM ist Six Sigma mehr als nur das Programm der Prozessentwicklung. Six Sigma basiert auf einer kontinuierlichen Qualitätsverbesserung bis fast zur Vollkommenheit und auf eine Reduzierung der Fehlerzahl bis zu 3,4 Fehlern pro Million Erzeugnisse/Fehlermöglichkeiten. Bei Statistical Process Control (SPC) und TQM kann man ein Qualitätsniveau erreichen, das nicht weiter zu verbessern ist. Für Six Sigma ist die Erreichung eines solchen Punkts nicht vorgesehen, sondern es gibt immer ein nächstes, besseres Niveau. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass die Qualität bei TQM in Übereinstimmung mit den inneren Anforderungen gewährleistet ist. Die Qualität bei Six Sigma kann immer mit Hilfe der Verringerung der Fehlerzahl verbessert werden. Six Sigma hilft den Unternehmen, die Produktionsausgaben mittels Fokussierung

auf Fehlerzahl, Taktzeit oder Selbstkostensenkung zu verringern (7). Seit Mitte der 1990er Jahre ist Six Sigma von Großunternehmen mehr und mehr übernommen worden (3).

Um die Ansprüche aus dem TQM und Six Sigma in der Praxis umsetzen zu können, dient eine Reihe von Hilfsmitteln, die an verschiedenen Stellen der Produktzyklen angewendet werden (3):

1. Sieben elementare Qualitätstechniken
2. FMEA
3. Statistische Prozessregelung
4. Experten-Methoden.

### **1.1.1. Sieben elementare Qualitätstechniken**

Seit 1900 wurden viele formalisierte Werkzeuge und Prinzipien zur Verbesserung der Qualität entwickelt und gesammelt. Wohl bekannt sind die sieben elementare Qualitätstechniken, die einfache Methoden oder visuelle Hilfsmittel darstellen, um Probleme zu erkennen, zu verstehen und zu lösen. Die sieben elementaren Werkzeuge (Q7) sind:

1. Brainstorming,
2. Fehlersammelkarte,
3. Qualitätsregelkarte,
4. Histogramm (Säulendiagramm),
5. Korrelationsdiagramm (Streudiagramm),
6. Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa- Diagramm),
7. Pareto-Diagramm.

Die Auswahl und Zusammenstellung der Q7 gehen auf Kaoru Ishikawa zurück. Eine entsprechende Technik: das Ursache-Wirkungs-Diagramm, entwickelte Ishikawa selbst. Diese Werkzeuge erleichtern den Problemlösungsablauf. Alle Methoden dienen zur Verbesserung der Produkt- oder Prozesseigenschaften in den Organisationen. Diese Grundmethoden stellen keine vollständige Antwort auf die Qualitätsfrage dar. Sie stellen ausgezeichnete Ergänzungen dar, und ihre Anwendung erhöht die Genauigkeit der Analyse des Qualitätsmanagementsystems im Betrieb.

Die Fehlersammelliste, die Qualitätsregelkarte und das Histogramm werden hierbei für die Fehlererfassung und die graphische Darstellung eingesetzt. Alle Informationen mit Bezug zu den Fehlerarten, -häufigkeiten und -orten werden gezählt und deren Vorkommen notiert.

Das Korrelationsdiagramm, Pareto-Diagramm, Brainstorming sowie das Ishikawa-Diagramm dienen der Fehleranalyse und der Lösungsfindung. Im Vordergrund steht hierbei die Fehleridentifikation und deren Zerlegung in die Bestandteile, um Wechselwirkungen zu erkennen.

## Brainstorming

Das Brainstorming ist eine Kreativitätstechnik, die meistens als Gruppenarbeit betrieben wird. Diese Technik hat zwei Phasen. Die erste Phase läuft ab, wenn alle Gruppenmitglieder alle ihre Ideen, Assoziationen und Lösungsvorschläge zu einer vorgegebenen Problemfrage einbringen. In der zweiten Phase folgen die Bewertung und Strukturierung der vorgeschlagenen Ideen. Dieses Werkzeug des Qualitätsmanagement ist deshalb besonders wichtig, weil bei dieser Technik kein Denkschema vorgegeben ist (8).

## Fehlersammelkarte

Mit diesem „Check Sheet“ verfügt man über eine übersichtliche Darstellung von Fehlern nach Art und Anzahl. Die Arten der Fehler bzw. Kategorien sollte man vorher in eine Tabelle einfügen (Abbildung 1-3).

Fehlersammelliste					
Produktnummer: 0121-245-1				Ort: Halle 3, Stelle 14	
Produktbezeichnung: Staubsauger Maxi				Prozess: Montage Gehäuse	
Nr.	Fehlerart	01.06.08	02.06.08	...	Gesamt
1	Kratzer am Gehäuse				14
2	Verschmutzung				7
3	Teil fehlt				3
4	Montagefehler				8
Prüfart: Sichtprüfung 120 Stück/Tag				Kontrolleur:  Herr Schiller	
Uhrzeit: 10:00 – 11:00					
Datum: 01.06.08-31.06.08					

Abbildung 1-3. Fehlersammelkarte

## Qualitätsregelkarte

Die Qualitätsregelkarte (Control Chart) ist ein graphisches Instrument zur laufende Überwachung eines Prozesses auf Stichprobenbasis. In einem Formblatt werden die Messwerte oder errech-

neten Kennzahlen von Stichproben gesammelt. Auf der Karte sind Sollwert sowie Warn-, Eingriffs- und Toleranzgrenze des zu untersuchenden Prozesses als Linie eingezeichnet (Abbildung 1-4).

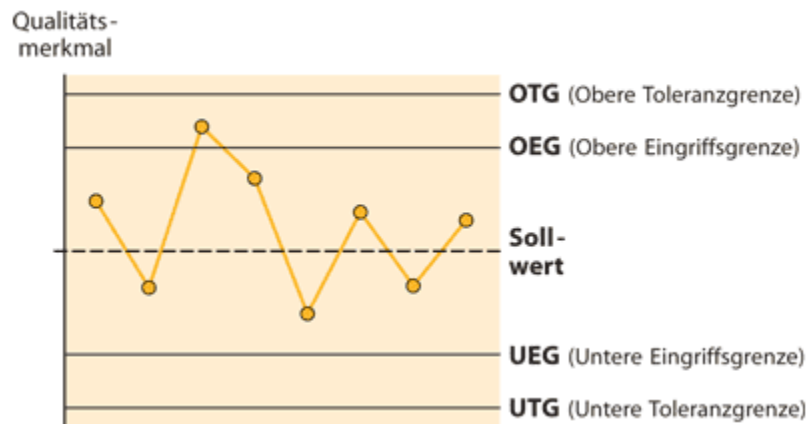


Abbildung 1-4. Beispiel einer Regelkarte (9 S. 17-24)

Die Prozessregelkarte ist das wichtigste Element zur Regelung der Produktionsprozesse durch die Mitarbeiter. Die Karte selbst ist ein Formblatt, auf dem in der Regel die Mittelwerte entnommener Stichproben dargestellt werden. Bei attributiven Merkmalen (Fehlern) werden diese gezählt und eingetragen.

### **Korrelationsdiagramm (Streudiagramm)**

Eine Korrelation ist eine eindeutige Beziehung zwischen zwei Merkmalen. Das Ziel des Korrelationsdiagramms ist, Beziehungen zwischen zwei Merkmalen aufzudecken. Die Achsen des Koordinationssystems enthalten die beiden Merkmale. Auf der Abbildung 1-5 ist als Beispiel eines Korrelationsdiagramms die Festigkeit in Abhängigkeit vom C-Gehalt eines Stahls aufgetragen. Die gemessenen Werte müssen als Punkte eingegeben werden. Auf der Abbildung 1-5 liegt ein stetiger Zusammenhang zwischen den Merkmalen vor: je höher der Kohlenstoffgehalt ist, desto höher ist auch die Festigkeit.

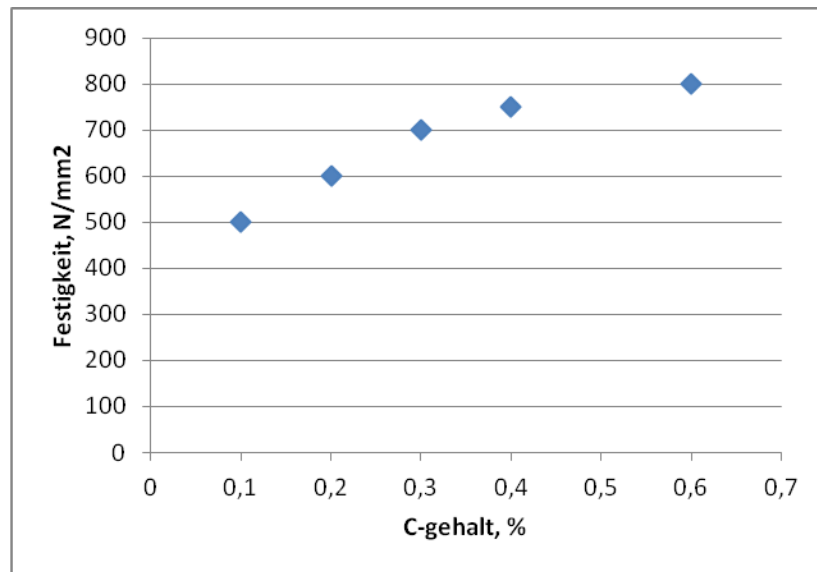


Abbildung 1-5. Kohlenstoffgehalt und Festigkeit eines Stahls (3)

Je stärker die Korrelation zweier Merkmale ist, desto eher kann auch ein ursächlicher Zusammenhang vorliegen. Die Stärke der Korrelation wird mit einer Korrelationszahl  $K$  ausgedrückt. Die Korrelationszahl kann maximal 1 betragen, und sie kann aus statistischen Daten berechnet werden (Abbildung 1-6).

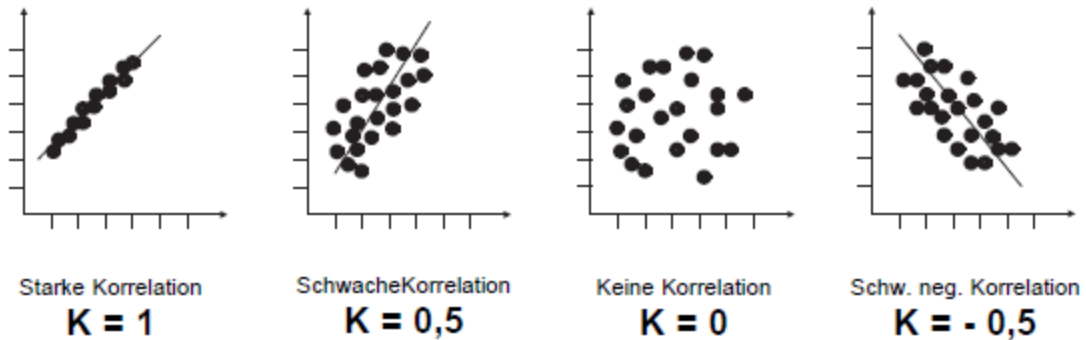


Abbildung 1-6. Beispiele verschiedener Korrelationszahlen (10)

### Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm)

Auf einen Produktionsablauf wirken immer verschiedenen Störungen ein. Mittels diesen Werkzeugs sind mögliche Ursachen oder Einflüsse, die zu einem Problem führen können, leicht zu erfassen (Abbildung 1-7). Ebenso kann man die Ursachen in die Haupt- und Nebenursachen zerlegen. Manchmal wird diese Methode auch 4M, 6M, 7M oder 8M genannt. Die ursprünglichen

Haupteinflussgrößen bei 4M; Material, Maschine, Methode, Mensch. Erweitert werden kann das bis 8M, d.h. ergänzt um Management, Mitwelt (Milieu), Messung und Geld (Money).

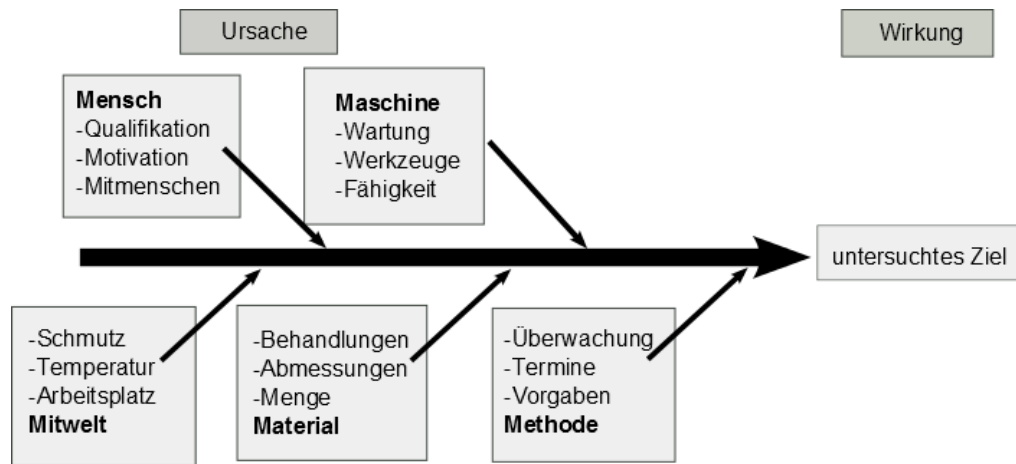


Abbildung 1-7. Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) (3 S. 29)

## Histogramm

Dieses Werkzeug dient der graphischen Darstellung von Veränderungen von Daten, z.B. in einem Prozess oder Prozessschritt. Auf diese Weise sind Aussagen über die Streuung von Prozessen möglich (Abbildung 1-8).

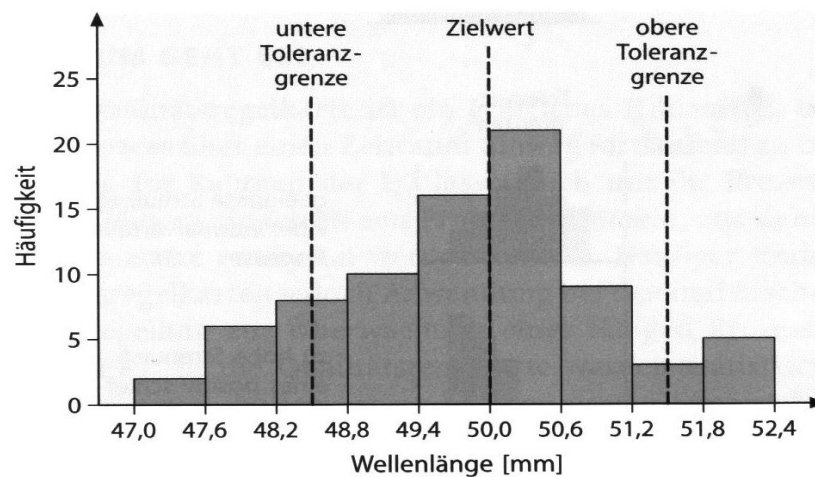


Abbildung 1-8. Grafische Darstellung einer Häufigkeitsverteilung (Beispiel Wellenlängen) (9 S. 12-17)

## Pareto-Diagramm

Mithilfe dieser Technik ist die Darstellung der Bedeutung einer Fehlerursache zur Gesamtheit der Fehlerursachen möglich. Das Pareto-Diagramm ist ein Säulendiagramm, in das die nach ihrer Priorität gewichteten Fehlerursachen mit absteigender Säulenhöhe eingetragen werden (Abbildung 1-9). Sie verdeutlicht, welche Problemursachen als erstes beseitigt werden müssen, um ein Problem zu mindern. Hier wird das Paretoprinzip benutzt, nach dem die meisten Auswirkungen eines Problems (80%) häufig nur auf eine kleine Anzahl von Ursachen (20%) zurückzuführen sind.

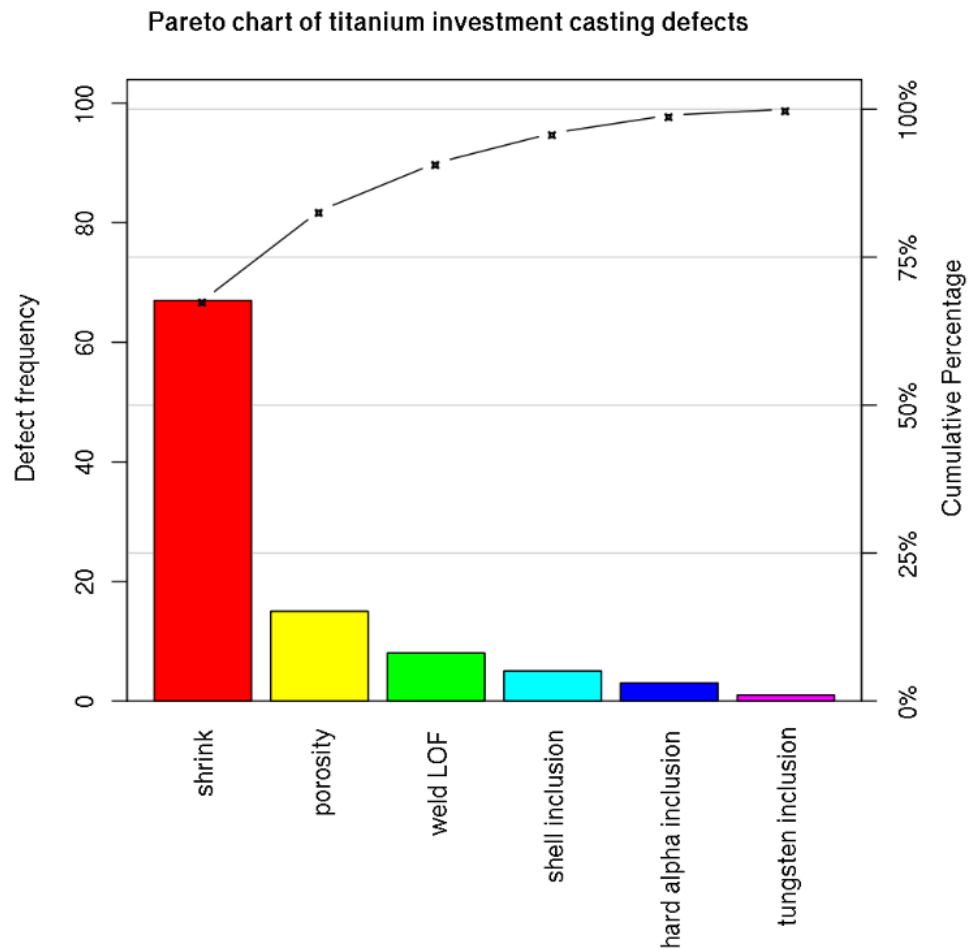


Abbildung 1-9. Pareto-Diagramm einer Fehleruntersuchung von Titagussteilen (11)



### 1.1.2. FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse)

FMEA ist eine präventive Methode zur Qualitätsverbesserung, d.h. eine Risikoanalyse durch die Ermittlung möglicher Fehler in den Elementen einer betrachteten Einheit sowie die Feststellung der erwarteten Fehlerfolge für die anderen Elemente und für die Funktion der betrachteten Einheit. Man unterscheidet drei Arten der FMEA-Analyse: System-FMEA, Konstruktions-FMEA und Prozess-FMEA. Mittels der System-FMEA wird der Systemzustand infolge der Fehler der einzelnen Parameter ermittelt. Bei der Konstruktions-FMEA sollen konstruktive Fehler einzelner Produkte oder Bauteile untersucht werden, die zu den potenziellen Schwachstellen führen können. Durch die Prozess-FMEA sollen die Fehler der Produktions- oder Leistungsprozesse ermittelt werden.

Im Laufe der FMEA soll mittels Brainstorming der Expertengruppe eine Tabelle erstellt werden, wo alle Komponenten, Systeme, Prozesse und Funktionen, die potentiell zu Qualitätsstörung führen können, ermittelt werden sollen. Die Experten müssen nicht nur die Fehler und deren Folgen beschreiben können, sondern auch die möglichen Ursachen benennen. Die Fehler sollen nach Bedeutung der Folgen auf Endbenutzer sortiert werden. Die Gruppe soll die Häufigkeit der Entstehung und den Detektionsgrad des Fehlers von 1 bis 10 (1 - niedrig, 10 - hoch) bewerten. Danach wird das Risikoniveau berechnet (eng. RPN - risk priority number):

$$RPN = \text{Bedeutung} \times \text{Häufigkeit} \times \text{Detektion}$$

Wenn die Fehler nach RPN fallend sortiert werden, kann man die wichtigsten Probleme aufschreiben und sich an ihnen fokussieren (12).

### 1.1.3. Statistische Methoden der Prozessregelung

Die statistischen Methoden stützen sich auf die physikalischen Wirkungen und die Benutzung von speziellen Messgeräten und der Entscheidung auf der Basis von Fakten. Zu diesen Methoden gehören fünf der sieben elementaren Qualitätstechniken: Fehlersammelkarte, Histogramm, Korrelationsdiagramm, Paretodiagramm und Qualitätsregelkarte. Zu den statistischen Methoden gehören auch: statistische Stichprobenprüfung und Stichprobenanalyse (Verteilung von Messwerten, Standardabweichung, Wahrscheinlichkeit der Fehler), Prozessfähigkeitsanalyse, Regressionsanalyse, usw.

### **1.1.4. Experten-Methoden**

Experten-Methoden sind für Gruppenbrainstorming geeignet und helfen Ideen, Fakten und Lösungen der Teilnehmer geordnet darzustellen. Zu diesen Methoden gehören die 7-W Fragen (Wo? Warum? Was? Wie? Wer? Bis wann? Wie viel?), das Affinitätsdiagramm mit geordneten Informationsmengen (dient zur Zuordnung der Ideen und Meinungen zu einem Oberbegriff), das Relationsdiagramm (veranschaulicht die Wechselwirkungen zwischen den Ursachen eines Problems), das Ursache-Wirkungsdiagramm (eines 7 der elementaren Werkzeuge), das Prozessentscheidungs-Diagramm (Variante des Baumdiagramms zur Optimierung von Prozessen und Maßnahmen), das Mind-Mapping (die Ideen und Meinungen werden zu einem zentralen Begriff verbunden), der Netzplan (Terminplanung bei den Projekten) usw.

## **1.2. Qualität in der Gießerei**

### **1.2.1. Gussstückqualität**

Die jeweilige Höhe der Qualität hat wesentlichen Einfluss auf das Betriebsergebnis: so werden zusätzliche Kosten verursacht, der Energieverbrauch steigt, Termine werden nicht eingehalten, Imageverlust und Konventionalstrafen sind die Folge. Werden die fehlerhaften Gussstücke noch beim Herstellen aussortiert, so können sie noch einmal eingeschmolzen und wieder vergossen werden. Wesentlich schwieriger wird es, wenn nach Ablieferung beim Kunden klar wird, dass die Gussstückqualität nicht den Vereinbarungen entspricht. Die Folgen können gravierend sein. Gussausschuss kann bei allen Legierungen und Verfahren angetroffen werden.

Das häufige Zusammenwirken mehrerer Einflussfaktoren erschwert oft das sichere Erkennen und Bekämpfen der Qualitätsprobleme und Ausschussursachen.

Gussstück – ist ein metallisches Erzeugnis (Gusserzeugnis), das direkt aus dem schmelzflüssigen Zustand in einer ein- oder mehrteiligen, offenen oder geschlossene Form, mit oder ohne eindeutige Richtung des Wärmeentzuges hergestellt wird. Allgemein definiert, ist ein Gußstück ein Werkstück, das seine Gestalt durch das Erstarren des flüssigen Metalls in einer Gießform erhält.

Gußfehler, in Gußstücken auftretende Fehler, welche zu Ausschuss führen können und material-, fertigungs- oder bearbeitungsbedingte Ursachen haben können.

Unter Gussausschuss versteht man fehlerhafte, für den bestimmten Verwendungszweck unbrauchbare Gussstücke, die die geforderte Qualität nicht aufweisen. Dabei versteht man unter Qualität das Vermögen einer Gesamtheit inhärenter Merkmale eines Produkts, eines Systems oder eines Prozesses zur Erfüllung von Forderungen der Kunden und anderer interessierten Parteien (2).

Aus Mangel an präziser Kenntnis ist eine Ausschussquote von 5% in den vielen Gießereien annehmbar. In einigen Gießereien beobachtet man höhere Ausschusswerte und/oder unterschiedlich verschiedene Typen von Fehlern (13).

Die Problematik der ständigen Gussstückqualitätsverbesserung ist auch gegenwärtig immer noch aktuell. Zur Bekämpfung des Gussstückausschusses existiert eine Reihe unterschiedlicher Methoden. Leider berücksichtigen diese oftmals nur ein einziges Gussfehlerprobleme, wobei unzureichend nach den Ursachen geforscht wird, um eine exakte Lösung des Problems abzuleiten.

### **1.2.2. Methoden zur Gussstückqualitätsverbesserung**

Eine traditionelle Anwendung der Fachleute bei der Gussfehlerbeseitigung sind unterschiedliche Handbücher und Gussfehleratlanten (14) (15) (16) (17). Bei deren Nutzung ist es oft mühselig, sich zu orientieren und die richtigen Ursachen abzuleiten, insbesondere dann, wenn mehr als eine Ursache zu berücksichtigen ist.

Nach Einführung der Rechentechnik werden neuere und effizientere Methoden erwartet. Gegenwärtig sucht man neue Methoden zur Gussausschussbekämpfung, wobei der Einsatz der Simulation im Vordergrund steht. Dies stellt das traditionelle Herangehen dar, wenn sich die Systeme theoretisch mit Hilfe von Differentialgleichungen beschreiben lassen und mit deren Hilfe bestimmte, im System auftretende Erhaltungsgesetze abgebildet werden können. Dies ist in der Regel eine arbeitsintensive und komplizierte Verfahrensweise, die viel Zeit und einen hohen Kostenaufwand erfordert. Sie dient zur Analyse von Systemen, die für die theoretische oder formelmäßige Behandlung zu kompliziert sind und wird bevorzugt bei dynamischen Systemen eingesetzt. Bei dieser Arbeitsweise werden Experimente an einem Modell durchgeführt, um Erkenntnisse über das reale System zu gewinnen. Oftmals muss dazu ein neues Modell entwickelt werden. Wenn ein geeignetes Modell vorhanden ist, um Aussagen über die zu lösende Problemstellung zu machen, müssen lediglich die Parameter des Modells eingestellt oder variiert werden. Die meisten in der Gießereiindustrie eingesetzten Simulationen sind Computersimulationen (numerische Simulation). Bei wichtigen Programmen (z. B. MagmaSoft, AutoCast) werden die Formfüllung und Wärmeübertragung berechnet.

Auch im Institut für Maschinenbau der TU Bergakademie Freiberg werden einige Arbeiten in der Richtung der Gussausschussbekämpfung durchgeführt. Derzeit wird das Auftreten von Ballenabrisen bei der Formherstellung intensiv erforscht. Dabei steht das Erforschen der Auswirkungen zwischen Verdichtbarkeit, Temperatur, Aktivtongehalt und Ballenabriss im Vordergrund des Interesses. In kleintechnischen Versuchen erfolgt eine vollständige Aufnahme der mess- und regelbaren Parameter, und anschließend untersucht man die Wechselwirkung der Parameter untereinander sowie deren Einfluss auf die Gussteilqualität. Im Rahmen des Forschungsprojekts innerhalb des Wachstumskerns „Precision Cast“ werden Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichsten Einflussparametern der Gussteilherstellung und der Gussqualität mit Hilfe von neuronalen Netzen untersucht. Insgesamt muss eingeschätzt werden, dass alle oben genannte Methoden ihre Berechtigung besitzen und durch die Weiterentwicklung einer jeden Erkenntnisgewinne erzielt werden.

Keine der oben genannten Methoden kann helfen, den Prozess der Gussfehlerbildung sehr schnell transparent zu machen, das gesamte komplizierte Netz von Ursachen der Gussfehlerentstehung und die Folgen ihrer Beseitigung anschaulich darzustellen und sehr rasch die Gruppe von Faktoren eindeutig zu definieren, die für die Gussfehler verantwortlich sind.

Der Hauptnachteil aller Methoden besteht darin, dass nur die aufgetretenen Gussfehler betrachtet werden, wobei oft nicht berücksichtigt wird, dass durch das Verändern eines Parameters zur Beseitigung des Gussfehlers ein neues Problemfeld hervorgerufen werden kann.

Sehr häufig beobachtet man aber auch Situationen, die eine derart arbeitsintensive, komplizierte Simulation nicht erforderlich machen, da die Ursache des Fehlers bereits aus dem Verständnis des Prozesses abgeleitet werden kann. Diese Methode kann relativ gut die Gussfehler prognostizieren, die sich eindeutig auf die Prozesse der Erstarrung zurückführen lassen, wie z. B. Mikroporosität (18). Leider ist das Vorhersagen von Gasporositäten, Kaltschweißen und Oxidhäuten oder anderen Fehlern nicht möglich, da das Entstehen dieser Defekte durch ein Zusammenwirken der Formfüllung und Erstarrung sowie weiterer Reaktion mit der Umgebung naturgemäß wesentlich komplexer ist.

Zurzeit werden in der Literatur zur Bekämpfung von Gussfehlern auch andere computerunterstützte, grundlegende Methoden diskutiert: z. B. klassische Expertensysteme, sogenannte Black-Box-Technologien (neuronalen Netze) aber auch kombinierte Methoden. Solche Systeme können unter dem Begriff „Entscheidungsunterstützungssysteme“ vereinigt werden. Beispiele deren An-

wendung zur Gussqualitätsverbesserung werden unten im Punkt 1.2.5. Entscheidungsunterstützungssysteme beschrieben.

### 1.2.3. Problemklassifizierung

Unter Problem versteht man einen Zustand, in dem etwas noch nicht so ist, wie man es gerne hätte oder es sich wünschen würde (19). Als Problem bezeichnet man auch unerwünschte Abweichung der Ist-Situation von der Soll-Situation (20) (z.B. niedrige Qualität).

Entsprechend dem Schwierigkeitsgrad wird zwischen einfachen und komplexen Problemen unterschieden. Laut (21 S. 11) liegt ein komplexes Entscheidungsproblem vor, wenn mindestens eine der folgenden Aussagen zutrifft:

1. Die mit dem Problem konfrontierte Person oder Personengruppe ist nicht in der Lage, das Problem klar abzugrenzen und präzise zu beschreiben.
2. Das Problem hat mehrere Facetten und lässt sich deshalb in mehrere nebeneinander und/oder nacheinander zu behandelnde Teilprobleme zerlegen. Diese Teilprobleme lassen sich aber nicht isoliert behandeln, sondern sind miteinander verknüpft.
3. Es besteht eine große Anzahl von möglichen Lösungsvarianten.
4. Falls keine dieser Eigenschaften zutrifft, handelt es sich um ein einfaches Entscheidungsproblem.

Dimensionen	Ausprägungen	
Schwierigkeitsgrad	Einfach	Komplex
Problemstruktur	Gut strukturiert	Schlecht strukturiert

Tabelle 1-2. Dimensionen von Problemen und ihre Ausprägungen (21 S. 12)

Nach der Problemstruktur werden alle Probleme laut (22 S. 5-6) in gut strukturierte (well-structured) und schwach strukturierte (ill-structured oder semi-structured) eingeteilt.

Gut strukturierte Probleme liegen vor, wenn folgende Aussagen zutreffen:

1. Das Problem kann mittels Termen der numerischen Variablen, Skalar- oder Vektorgrößen beschrieben werden.

2. Die Ziele können mittels Termen der wohldefinierte Zielfunktion bestimmen werden, zum Beispiel Maximierung des Gewinns.
3. Es gibt oder es ist entwickelbar ein analytisches Verfahren (Algorithmus), das für die Auffindung der Problemlösung anwendbar ist und mittels Termen der numerischen Variablen beschrieben werden kann.

Mit anderen Worten, bezeichnet man die gutstrukturierte Probleme als Probleme, die un-  
zweideutig, quantitativ formuliert und mittels bekannter, realisierbarer Rechentechnik gelöst werden  
können.

Alle anderen Probleme, die nicht gut strukturiert sind, bezeichnet man als schwachstrukturierte Probleme. Die schwachstrukturierten Probleme werden auch als qualitative Probleme bezeichnet, das heißt, dass man solche Probleme nicht quantitative formulieren kann, weil es nur qualitative beschreibbare Elemente gibt, die wenig bekannt und unbestimmt sind und die die Tendenz zum Dominieren aufweisen. Der Unterschied zwischen gut- und schwachstrukturierten Probleme kann man mittels Tabelle 2 illustrieren.

Gutstrukturierte	Schwachstrukturierte
Man kann solche Probleme vollständig beschreiben	Man kann solche Probleme nicht vollständig beschreiben
Die Probleme können mit hohem Gewissheitsgrad gelöst werden	Die Probleme können nicht mit hohem Gewissheitsgrad gelöst werden
Normalerweise sind alle Experten einverstanden mit einer korrekten Lösung	Die Experten widersprechen häufig einander, welche Lösung die beste ist

Tabelle 1-3. Problemtypen (23)

Dem Typ des Problems gemäß sollen die jeweiligen Entscheidungen getroffen werden. Die Auswahl der Problemlösungsmethoden kann mit der Abbildung 1-10 illustriert werden.

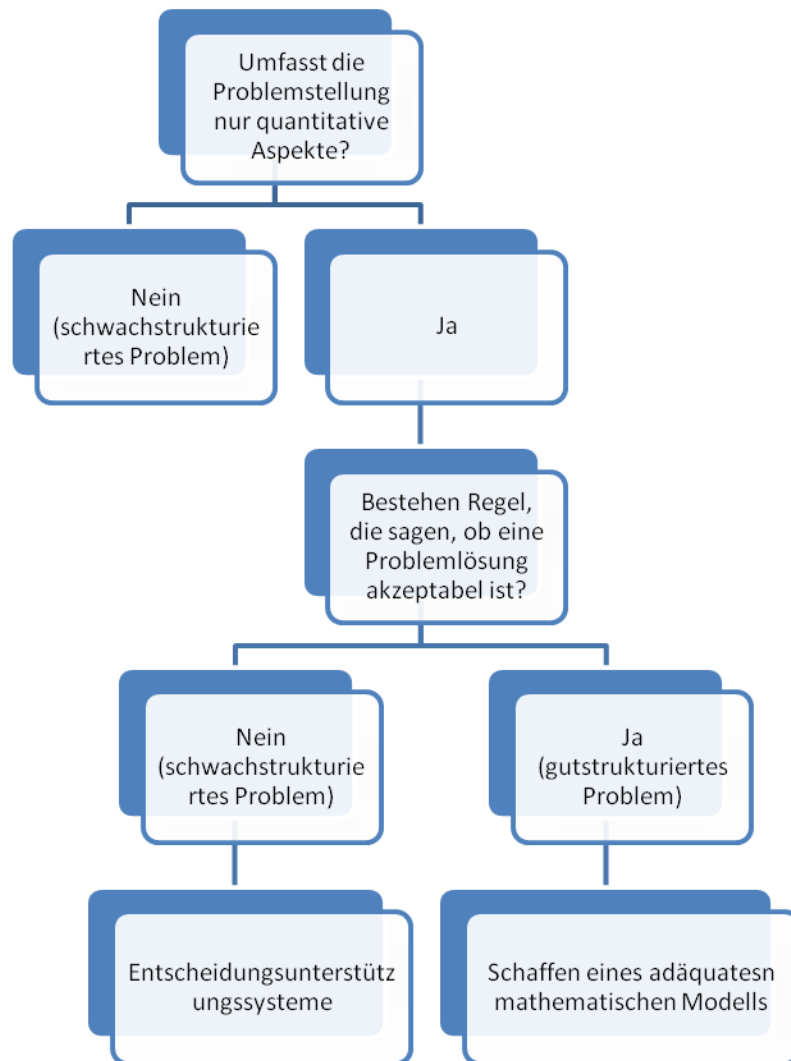


Abbildung 1-10. Auswahl der Problemlösungsmethoden (21 S. 67)

Zur Problemlösung in den gut strukturierten und quantitativ definierten Systemen soll eine strukturierte Entscheidung getroffen werden. Dafür wird schon die bekannte Methodologie der Verfahrensforschung benutzt, die im Schaffen eines adäquaten mathematischen Modells (z.B. lineare Optimierung, dynamische Programmierung, Spieltheorie, Simplex Methode, System Dynamics usw.) und in der Auffindung der optimalen Strategie zur zweckgerichteten Steuerung besteht. Strukturierte Entscheidungen werden auf jedem Fall mittels definit repetitiver Verfahren getroffen.

Um die Probleme in den schwach strukturierten und qualitativ definierten Systemen zu lösen, sollen schwachstrukturierte Entscheidungen angewendet werden. Solche Entscheidungen können mittels einem exakten Verfahren (Schaffen des adäquaten mathematischen Modells) nur teilweise gelöst werden. Falls der Entscheider das Problem vollständig lösen will, soll er in das Wesentliche

des Entscheidungsverfahrens eindringen, d.h. beurteilen, bewerten usw. Dafür benutzt man Entscheidungsunterstützungssysteme, die auf der Systemanalyse basieren, womit die Prozesse des Wissensaufbaus und Wissenstransfers erleichtert werden.

Ein Entscheidungsunterstützungssystem, nach (24 S. 60), ist ein Mensch-Maschine-System, das dem Analytiker durch die Benutzung eigenen Kenntnisse und Erfahrung hilft, das Problem zu analysieren und zu lösen.

#### **1.2.4. Gussstückqualität als kompliziertes schwach strukturiertes System**

Die Gussstückqualität und die dazu gehörigen Qualitätsmerkmale sind von einer sehr großen Zahl von Einflussgrößen abhängig. Die Abhängigkeiten einzelner Qualitätsmerkmale sind in der Regel sehr komplexer Natur, d. h. bestimmte Einflussfaktoren können gegenläufige Wirkungsintensitäten und komplizierte innere Zusammenhänge besitzen. Manche Faktoren besitzen unter dem Einfluss der anderen Faktoren ein dynamisches Verhalten. Es ist bekannt, dass viele Faktoren die gesamte Qualität beeinflussen. Hinzu kommen oft die Unkenntnis über die Gesamtheit der beeinflussenden Faktoren und die eingeschränkten Möglichkeiten ihrer quantitativen Erfassung. Oft sind die Kenntnisse gegenseitiger Wechselwirkungen auch unzureichend. Aus diesen Gründen und der Abhängigkeiten ungewisser verbaler Information ist es unmöglich, ein quantitatives mathematisches Modell für ein solches System zu formulieren.

Das heißt, dass Qualitätsmanagement bei der Gussfehlerbekämpfung weist alle Eigenschaften eines schwachstrukturierten Systems auf. Zu diesen Eigenschaften gehören folgende Beispiele: Vielzahl voneinander abhängiger Parameter, Gegenläufigkeit der Parameter, Abhängigkeiten mathematisch oft nicht beschreibbar, instationäre und dynamische Prozesse, Veränderung eines Parameters kann ein neues Problem hervorrufen. Entsprechend dem Diagramm auf Abbildung 1-10 wäre es sinnvoll, ein Entscheidungsunterstützungssystem zu verwenden.

#### **1.2.5. Entscheidungsunterstützungssysteme**

Entscheidungsunterstützung ist eine Assistenz beim Prozess der Entscheidung. Sie umfasst die Auswahl der besten oder optimalen Strategie zur Erreichung der vorgegebenen Ziele aus der



Menge alternativer Strategien. Die große Anzahl der Nebenbedingungen, die Notwendigkeit der Entscheidung unter Risiko und die Ungewissheit wirken auf den Entscheidungsprozess ein (25).

Entscheidungsunterstützungssysteme (von eng. Decision Support System, DSS) sind die Systeme, die als Hilfsmittel bei Entscheidungsunterstützung in Verwaltungstätigkeit und Management benutzt werden. Oder mit anderen Worten, Entscheidungsunterstützungssysteme sind Softwareprodukte, die auf die Vervollkommnung der Qualität der Managemententscheidungen abzielen.

Das Entscheidungsunterstützungssystem schließt Tools für schwachstrukturierte Entscheidungen ein, so dass sie für schwachstrukturierte Probleme angewendet werden können. Da die Entwicklung des Entscheidungsunterstützungssystems für derart spezifische Probleme, wie Qualitätsverbesserung, erhebliche Erfahrungen in der Entscheidungsanalyse sowie im Problemgebiet als auch in der Rechentechnik, erfordert, ist die Verbreitung der Entscheidungsunterstützungssysteme eingeschränkt. Es gibt mehrere Klassifizierungen der Entscheidungsunterstützungssysteme, z.B. nach der Rolle der Entscheidungsträger: passive, aktive und kooperative Entscheidungsunterstützungssysteme.

Passive Entscheidungsunterstützungssysteme sammeln nur an, während effektive die Daten ordnen. Sie schlagen keine spezifische Entscheidung vor und helfen nur die Fakten aufzudecken. Aktive Entscheidungsunterstützungssysteme bearbeiten die Daten real und zeigen explizit eine Entscheidung, die auf den bearbeiteten Daten basiert. Kooperative Entscheidungsunterstützungssysteme sammeln und analysieren die Daten. Anschließend überprüft, revidiert oder verbessert der Mensch die möglichen Entscheidungen des Systems, d.h. Rechentechnik und Mensch treffen die beste Entscheidung kooperativ.

Eine andere Klassifikation nach dem Assistenzstyp ist: Model Driven Entscheidungsunterstützungssysteme, Communications Driven Entscheidungsunterstützungssysteme, Data Driven Entscheidungsunterstützungssysteme, Document Driven Entscheidungsunterstützungssysteme und Knowledge Driven Entscheidungsunterstützungssysteme (26 S. 10).

Model-Driven Entscheidungsunterstützungssysteme sind zum Schaffen und zur Arbeit mit komplexen statistischen, finanziellen Optimierungs- und Simulationsmodellen geeignet. Solche DSS fordern vom Entscheidungsträger die Eingabe der Modellparameter (27 S. 10). Durch Änderung der Modellparameter kann man eine "Was-wenn-Analyse" durchführen sowie verschiedene Szenarien und Vorhersagen simulieren (28).

Communications Driven Entscheidungsunterstützungssysteme sorgen für eine Entscheidung durch effiziente Datenkommunikation innerhalb einer Gruppe von Entscheidungsträgern. Der In-

formationsaustausch simuliert die Intelligenzentwicklung und ermöglicht die Entscheidung im Konsens von verschiedenen Entscheidungsträgern.

Die Hauptverfahren der Data Driven Entscheidungsunterstützungssysteme sind die Datenverarbeitung. Sie verarbeiten große Menge der gesammelten Messwerte bei Unternehmen. Durch das Aufdecken der versteckten Informationen werden Entscheidungen getroffen. Für solche DSS können auch Neuronale Netze zur Datenanalyse und Vorhersage aufgrund der gesammelten Daten angewendet werden (29). Diese Systeme suchen versteckte Patterns und benutzen die Data Mining Methoden.

Document Driven Entscheidungsunterstützungssysteme basieren sich auf der Verarbeitung und Analyse der unstrukturierten Information einer großen Anzahl der elektronischen Dateien (z.B. Hypertext Dokuments, Bilder, Audio- und Videodateien). Beispiel solcher DSS sind Suchmaschinen (z.B. Google).

Knowledge Driven Entscheidungsunterstützungssysteme schlagen Entscheidungen auf der Basis der menschlichen Kompetenz vor. Erfahrungen, die von Experten gesammelt werden. Solche Systeme stellen Kenntnisse als Fakten und Regeln dar. Zu diesen gehören beispielweise Case-Based Reasoning Systeme, Experten Systeme.

Model-driven Entscheidungsunterstützungssysteme wurde traditionell als DSS genannt, weil die meisten DSS mit Modellfunktion darunter entwickelt wurden, ebenso wie andere DSS Funktionen (z.B. Gruppen Kommunikation, Daten Analyse usw.) (26 S. 11).

Entscheidungsunterstützungssysteme, die die kognitiven Techniken der künstlichen Intelligenz benutzen, werden Intelligente Entscheidungsunterstützungssysteme genannt. Oft benutzt man folgende intelligente Techniken bei der Erarbeitung der Entscheidungsunterstützungssysteme: Experten-Systeme, künstliche neuronale Netze, Fuzzy Logik, case-based reasoning, genetische Algorithmen. Abbildung 1-11 zeigt einige Beispiele der anwendbaren Entscheidungstechniken.

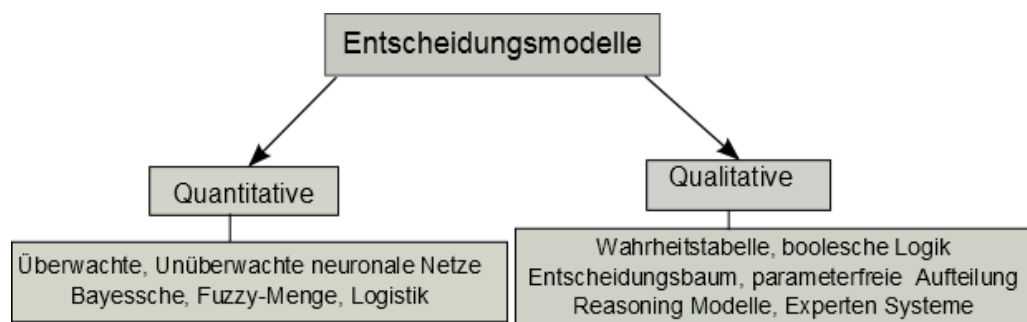


Abbildung 1-11. Arten von Entscheidungsmodellen (30)

Weit verbreitete intelligente Entscheidungsunterstützungssysteme sind Experten-Systeme. Sie streben an, die menschliche Erfahrung zu ermitteln und in Rechenprogrammen umzusetzen. Bezüglich der Wissenspräsentation können die Experten-Systeme in 3 Hauptklassen unterteilt werden: Fallbasierte Systeme (Case-Based Reasoning), Regelbasierte Systeme (Rule based systems) und solche, die auf Entscheidungsbäumen basieren.

Die Grundidee des Case-Based-Reasoning (CBR) ist die Bearbeitung einer gegebenen Problemstellung durch Anwendung von Lösungswissen, das in vorhergehenden Situationen gewonnen wurde (31). Die Methode besteht im Auffinden des ähnlichsten Analogons der Problemsituation und in der Auswahl derselbe Lösung, welche für vorherige Situation richtig war. Deswegen werden solche Systeme auch als „nearest-neighbor“ Systems bezeichnet (von englisch – „nächster Nachbar“). Die CBR Systeme zeigen sehr gute Ergebnisse bei verschiedenen Problemen. Aber sie schaffen keine Modelle oder Regeln, die die vorherigen Erfahrungen auswerten. Die Problemlösung basiert auf dem gesamten zugänglichen Datenumfang. Es ist unmöglich zu sagen, auf welchem konkreten Grund die Lösung ausgewählt wurde.

Regelbasierte Systeme lassen das Wissen abstrakt mit *Regeln* beschreiben. Sie bestehen aus einer Regelbasis (als Produktionsregeln „Wenn-dann-sonst“), einer Faktenbasis (wo befinden sich Bewegungsfakten) und Interpreter (der trifft die Entscheidung auf der Grundlage der Übereinstimmung der Bewegungsfakten und der Produktionen, an denen sie beteiligt sind). Alle Fakten und Regeln sollen von Experten eingegeben werden.

Entscheidungsbäume sind eine Art von hierarchischen sukzessiven Datendarstellungen, wo jedem Objekt ein einziger Knoten entspricht, der zur Entscheidung führt. Entscheidungsbäume werden für die Aufgaben der Datenklassifizierung benutzt, wenn es viele Fälle gibt, die mit einer endlichen Zahl der Merkmale beschrieben werden. Experten-Systeme arbeiten in einer Frage-Antwort-Session. Ein typisches Expertensystem besteht aus zwei Teilen: der Inferenzmaschine und der Wissensdatenbank. Einige Expertensysteme wurden zur Analyse von Gussfehlern erarbeitet. Die meisten Experimente wurden jedoch ohne Erfolg beendet, weil einige Probleme aufgetreten sind. Je komplizierter das System ist, desto mehr rechnetechnische Anforderungen sind erforderlich und desto langsamer ist das Expertensystem. Die Expertensysteme sind nur dann arbeitsfähig, wenn das Problem eng beschränkt ist. Bei der Arbeit mit ihnen ist es sehr schwer vorherzusehen, wie sich die Systemwerte ändern, wenn der Versuch unternommen wird, den Systemszustand insgesamt zu verbessern. Gegenwärtig werden Expertensysteme zum Identifizieren eines Gussfehlers in ein Gussteil

und zum Diagnostizieren der Ursachen dieses Gussfehlers angewendet (13). Aber in der Gießerei-praxis tritt häufig mehr als ein Gussfehler je Gussteil auf. Die Technologie der Expertensysteme kann die Fragen der Qualitätssicherung in der Regel nicht beantworten. Sie geben lediglich die Information, die der Experte schon wissen müsste (32).

Entscheidungsunterstützungssysteme, die auf "künstlichen neuronalen Netze" basieren, sind informationsverarbeitende Systeme, die biologischen Neuronalen Netzen nachempfunden sind und mit denen sich schwach strukturierte betriebswirtschaftliche Fragestellungen sehr erfolgreich bearbeiten lassen. Das Problem der neuronalen Netze besteht in einer fehlenden Anschaulichkeit des Ereignisentstehungsprozesses, und es ist oft nicht nachvollziehbar, auf welcher Basis man Schlussfolgerungen zum Bekämpfen des Gussfehlers ziehen muss. Im Prinzip lassen sich alle Prozesse, über die große Informationsmengen vorhanden sind, mit neuronalen Netze simulieren. Leider verfügen die Gießereien nicht über ausreichende Informationen zum Prozessverlauf in der erforderlichen Form für die Nutzung entsprechender Software. Neuronale Netze stellen eine Menge von Algorithmen dar. Die Algorithmen können unbekannte funktionelle Beziehungen an Beispielen erlernen, was aber nicht mehr als eine effiziente multidimensionale Interpolationstechnik darstellt. Der Vorteil der neuronale Netze besteht darin, dass sie bessere Ergebnisse als die äquivalenten Regressions-techniken geben (32). Trotz der Vorteile der neuronale Netze gegenüber den Expertensystemen und traditionellen Regressionsberechnungen liefern die neuronale Netze keine vollständige Lösung für die Qualitätssicherung (13).

Ein genetischer Algorithmus ist ein Verfahren, das zur Lösung von Such- und Optimierungsproblemen dient. Der Erfolg der genetischen Algorithmen liegt in der Nachahmung der biologischen Evolution, die selbst ein fortwährender Optimierungsprozess ist.

An der Schanghaier Universität wurde die Herangehensweise der Novel Expert Network erarbeitet. Sie vereinigt die Arbeit der Expertensysteme mit den neuronalen Netzen. Das Expertensystem wird zum Identifizieren der Gussfehler benutzt, während die neuronalen Netze zum Aufdecken ihrer potentiellen Ursachen eingesetzt werden. Die Autoren sind der Meinung, dass das in einem neuronalen Netz integrierte Expertensystem viel flexibler und schneller sein kann. Leider bleiben aber die Nachteile beider Methoden erhalten (33).

Im Fall der schwachstrukturierten Systeme ist die Formulierung eines glaubwürdigen quantitativen mathematischen Modells eine sehr schwierige oder eben unerfüllbare Aufgabe, infolge der mangelnde quantitative Daten, der unstrukturierten Natur, der Unkenntnis über die Gesamtheit der

beeinflussenden Faktoren und die eingeschränkten Möglichkeiten ihrer quantitativen Erfassung. Sehr häufig beobachtet man aber auch Situationen, die eine arbeitsintensive, komplizierte Simulation nicht erforderlich machen, da die Ursache des Fehlers bereits aus dem Verständnis des Prozesses abgeleitet werden kann.

Häufig gibt es keine Notwendigkeit, die Kosten und die Zeit auszugeben, weil das Problem im Verständnis der sich abspielenden Prozesse liegt. Im Falle der Gussfehlerbekämpfung ist es oft nicht möglich, aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren, der Unbestimmtheit ihrer Wechselwirkungen oder dem Nichtvorhandensein von eindeutig definierten und exakten Werten hinreichend genaue mathematische Modelle zu schaffen. Sogar heutzutage liegen solche Wechselwirkungen vor, die bis jetzt mathematisch nicht beschreibbar sind. Das führt dazu, dass eine aussagekräftige Modellierung nicht möglich ist.

Das Qualitätsmanagement bei der Gussfehlerbekämpfung weist alle Eigenschaften eines schwachstrukturierten Systems (Vielzahl voneinander abhängiger Parameter, Gegenläufigkeit der Parameter, Abhängigkeiten mathematisch oft nicht beschreibbar, instationäre und dynamische Prozesse, Veränderung eines Parameters kann ein neues Problem hervorrufen) auf. Infolgedessen kann die Beseitigung eines Fehlers häufig einen neuen Fehler hervorrufen (Abbildung 1-12) (34).

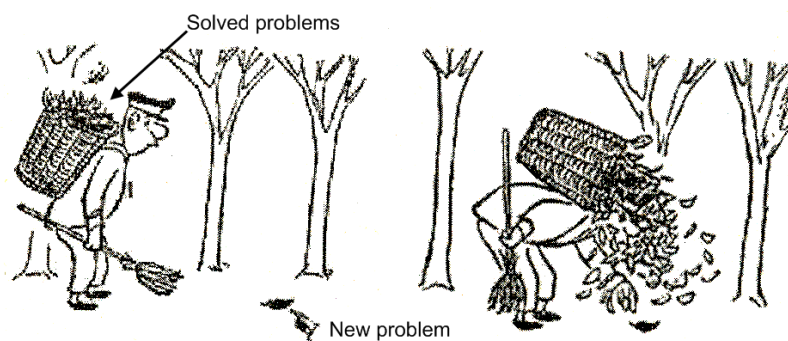


Abbildung 1-12. Entscheidung

Die Analyse der existierenden Verfahrensweisen und deren Nachteile beim Einsatz zur Gussfehlerbekämpfung führte dazu, eine neue Methode zu suchen, die auf der Systemabbildung in Form von kognitiven Karten basiert. Mit der Bereitstellung eines geeigneten kognitiven Modells zum Beschreiben und Analysieren des Systems kann man sehr schnell und bequem quantitative virtuelle Experimente im System durchführen und somit Informationen über sein Verhalten gewinnen.

Um die sich abspielenden Prozesse zu veranschaulichen, wird die kognitive Herangehensweise zur Modellierung und Simulation vorgeschlagen. Diese basiert auf kognitiven Aspekten, d. h.

einschließlich der Prozesse von Auffassung, Denken, Wissen, Auslegung und Verständnis. Die neue Methode schafft die Voraussetzung, den Prozess der Gussfehlerentstehung sehr deutlich transparent zu machen, das gesamte komplizierte Netz von Gussfehlerursachen und den erforderlichen Maßnahmen zu ihrer Beseitigung anschaulich darzustellen und sehr rasch die Gruppe von Faktoren eindeutig zu definieren, die für die Gussfehler verantwortlich sind. Außerdem kann man nicht nur bekannte Wechselwirkungen berücksichtigen, sondern auch die, die nur vermutet werden.

Der Kampf gegen Gussfehler kann unerwartete Nebenwirkungen für die Gießerei bringen: Energieaufwand, erhöhte Kosten, Terminprobleme, Herabsetzung der Produktivität. Die kognitive Simulation ermöglicht es, schnell mehr oder weniger genaue Experimente mittels spezieller Software durchzuführen und notwendige Information für eine Entscheidung zu gewinnen.

Die Einsatzmöglichkeit der kognitiven Modellierung ist auch in größeren Systemen, wie Stadtverwaltung, Management in der Betriebssicherheit (35), Zeiterfassungsmethodik im Konverterstahlwerk (36) nachgewiesen worden. Alle diese Systeme sind schwachstrukturierte Gebilde, in dem es eine große Anzahl von sich beeinflussenden Faktoren (im Fall der Betriebssicherheit über 80) und wechselseitigen Verbindungen sowie unzureichende quantitative Informationen über die Prozessdynamik gibt. Das heißt, dass die kognitive Arbeitsweise schon bei anderen schwachstrukturierten Systemen getestet wurde. Unter diesem Blickwinkel kann man dem System eines Gussqualitätsmanagements vergleichbare Eigenschaften zuordnen, so dass die kognitive Modellierung auf diesem Gebiet arbeitsfähig und sehr hilfreich sein sollte.

## **Teil 2. Anwendung der kognitive Modellierung**

### **2.1. Entwicklung der kognitiven Karten**

Der Begriff der kognitiven Karten wurden erstmals im Jahre 1948 vom amerikanischen Psychologen Tolman, E. C. (37) vorgeschlagen. Während der Aufnahme einer Verhaltensanalyse von Ratten in einem Labyrinth kam Tolman zum Schluss, dass eine besondere Struktur sich bei den Ratten herausbildet, die als kognitive Karte des Milieus bezeichnet werden kann.

Tolman vermutet, dass derartige kognitive Karten auch das menschliche Verhalten bestimmen, d. h. die kognitive Karte kann man als schematische, vereinfachte Beschreibung des Milieus (oder seines Fragments, das zur Problematik der Forschung gehört) des Individuums verstehen.

#### **2.1.1. Klassische kognitive Karte**

Klassische kognitive Karten stellen einen gerichteten Graphen des Typs  $G = (E, W)$  dar, wobei die Elemente  $E$  – die Faktorengesamtheit  $e_i \in E$  und die Verbindungen  $W$  – die Kausalverbindungen zwischen den einzelnen Faktoren  $w(e_i, e_j) \in W$  widerspiegeln und  $w: E \times E \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ .

Mit anderen Worten die Kausalverbindungen können nur mit 1 (wenn die Änderungen von beiden Elementen in die gleiche Richtung gehen), mit -1 (wenn die Änderungen von beiden Elementen in verschiedene Richtungen gehen) oder mit 0 (wenn die Verbindung unberücksichtigt bleiben kann) dargestellt werden.

Im Jahr 1963 erscheint ein Artikel von Magoroh Maruyama, in dem Netzwerke mit positivem und negativem Feedback dargestellt und mutual kasuale Beziehungen zwischen mehr als zwei Elementen analysiert wurden. Er benutzte zum ersten Mal positive und negative Beziehungen zwischen den Elementen und legte die Bedeutungen von „+“ und „-“ fest. Die positive Verbindung (+) bedeutet, dass die Änderungen von beiden Elementen in eine Richtung gehen (nicht unbedingt in positiver Richtung). Die negative Verbindung (-) bedeutet, dass die Änderungen von beiden Elementen in verschiedene Richtungen gehen (38).

Ebenfalls bestimmte er die indirekten Wirkungen zwischen Faktoren am Beispiel vom Looping (Abbildung 2-1). Wenn der Looping eine gerade Zahl der negativen Verbindungen hat, dann wird die gesamte indirekte Wirkung positiv. Wenn der Looping eine ungerade Zahl der negativen Verbindungen hat, dann wird die gesamte indirekte Wirkung negativ.

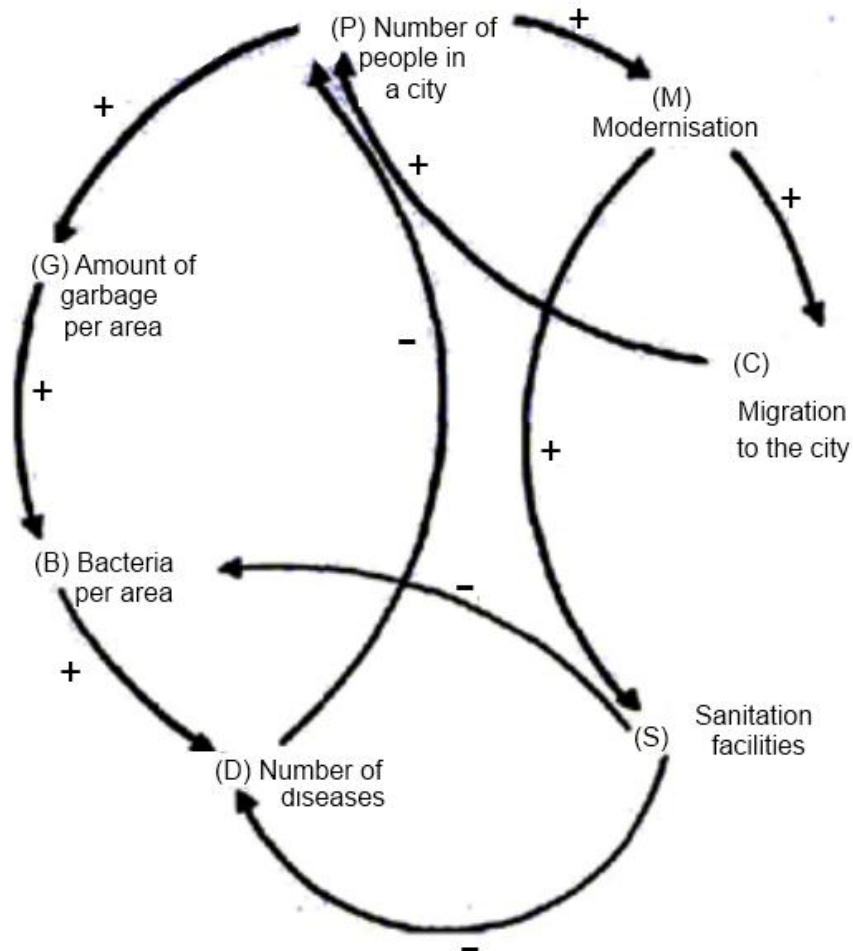


Abbildung 2-1. Maruyamas Modell

Späterhin wurden die kognitiven Karten in den Politikwissenschaften bei Axelroad, R. (39) und in den Wirtschaftswissenschaften bei Roberts, F. (Problemgebiet: Energiebedarf)(40) benutzt.

Axelrod hat zum ersten Mal die klassischen kognitiven Karten zur Darstellung des sozialen und wissenschaftlichen Wissens benutzt. Mittels kognitiver Karten analysierte er schwach bestimmte Situationen beispielweise im Problemgebiet: britische Politik in Persien (41).

Axelrod stellte die kognitive Karte als Adjazenzmatrix dar (Abbildung 2-2).



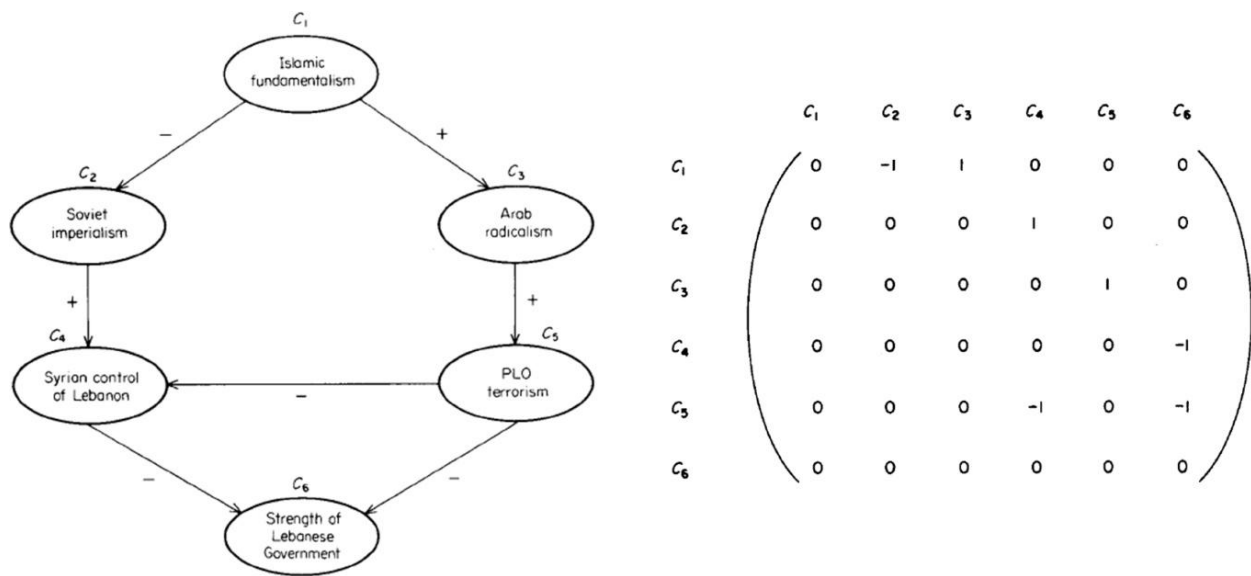


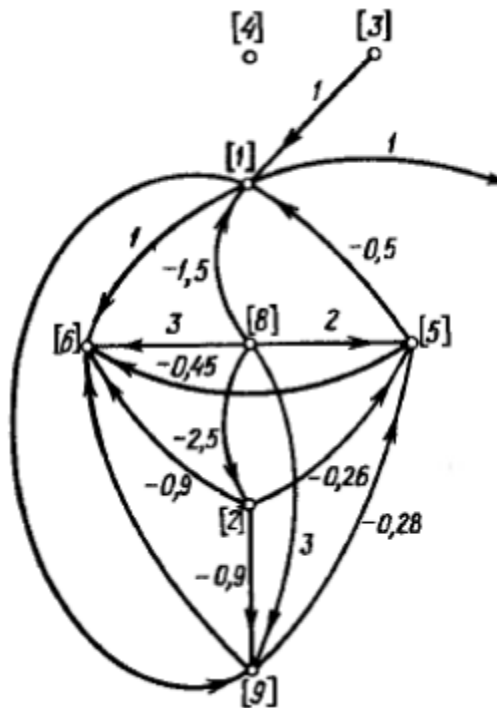
Abbildung 2-2. Klassische kognitive Karte und Adjazenzmatrix (42)

Die Beschreibung der kognitiven Karten mittel Adjazenzmatrix macht das kognitives Modell berechenbar. Mit diesem Moment ist es möglich, die neuen Kenntnisse über das System mittels Simulation zu erhalten (43) .

Der Hauptnachteil der klassischen kognitiven Karten ist die Unmöglichkeit zwischen positiver und negativer Wechselwirkungskraft von Faktoren zu unterscheiden. Daher kommt es zu einer Unbestimmtheit, wenn auf einen Faktor zwei Faktoren, einer mit negativem Einfluss und ein zweiter mit positivem, wirken. In solch einer Situation ist es schwer zu sagen, welcher Faktor überwiegt.

Roberts führte in seiner Arbeit (40) als Beispiel die Anwendung zum Bezeichnen der Wechselwirkungskraft zwischen den Elementen eines kantengewichteten Graphen an (Abbildung 2-3) und formulierte den Berechnungsalgorithmus zur Weiterentwicklung der Situation mittels Impulsprozessen.

In kantengewichteten Graphen bestimmen die Bögen nicht nur die Richtung der Wechselwirkung, sondern auch den Wirkungsgrad der verbundenen Faktoren.



- [1] Länge der Reise
- [2] Brennstoffeinsparung
- [3] Bevölkerung
- [4] Autopreis
- [5] Reisepreis
- [6] Volumen der Schadstoffemission
- [7] Unfälle
- [8] Durchschnittliche Verzögerung
- [9] Brennstoffverbrauch

Abbildung 2-3. Roberts, kantengewichteter Graph zur Analyse des Brennstoffverbrauchs und der Luftverunreinigung in San Diego, Kalifornien

Einen großen Beitrag zur Entwicklung der kognitiven Karten hat Kosko, B. (42)(44) geleistet. Er entwickelte die bekannteste Modifikation der kognitiven Karten – die sogenannten fuzzy kognitiven Karten (englisch: FCM - fuzzy cognitive maps). In FCM liegen die Faktorwerte und Verbindungen im Wertebereich von [-1 bis +1], und man verwendet eine Werteskala. Beispielsweise sind die Kausalgrößen  $P = \{\text{none, a little, usually, much, very much, a lot}\}$  auf der Abbildung 2-4. Damit können die Experten, die das Modell bilden, die Faktorenbeziehungen natürlich sprachlich formulieren.

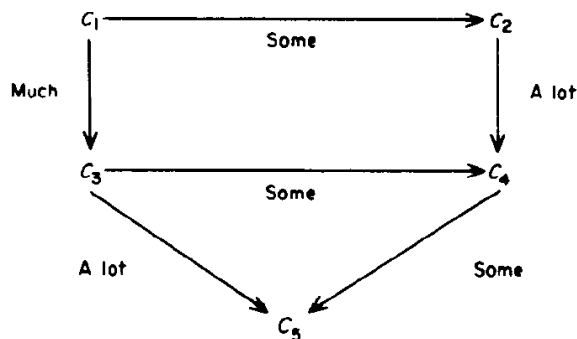


Abbildung 2-4. Koskos Beispiel (42 S. 73)

Die fuzzy kognitive Karte stellt ein gerichtetes Kausalnetz des Typs  $G = (E, W)$  dar, wobei  $E$  - die Menge der Faktoren  $e_i \in E$ ;  $W$  - die Menge der Verbindungen zwischen denen  $w(e_i, e_j) \in W$  und  $w: E \times E \rightarrow [-1, 1]$ .

Für die Berechnung der indirekten Wechselwirkungen hat B. Kosko folgenden Algorithmus vorgeschlagen: bezeichnen wir als  $I_l(c_i, c_j)$ ,  $1 \leq l \leq m$  indirekte Verbindung des Faktors  $c_i$  auf  $c_j$ ,  $m$  - Anzahl der mögliche Verbindungen,  $T(c_i, c_j)$  - gesamte indirekte Verbindung des Faktors  $c_i$  auf  $c_j$  von  $m$  mögliche Verbindungen, dann  $I_l(c_i, c_j) = \min\{e(C_p, C_{p+1}) : (p, p+1) \in (i, k_1^l, k_2^l, \dots, j)\}$ , wobei  $p$  und  $p+1$  sind Zwischenindizes und  $T(c_i, c_j) = \max_{1 \leq l \leq m} I_l(C_i, C_j)$ .

Es gibt drei mögliche Ketten von C1 bis C5: C1-C3-C5, C1-C3-C4-C5 und C1-C2-C4-C5:

$$I_1(c_1, c_5) = \min\{e_{1,3}, e_{3,5}\} = \min\{much, alot\} = much,$$

$$I_2(c_1, c_5) = \min\{e_{1,3}, e_{3,4}, e_{4,5}\} = \min\{much, some, some\} = some,$$

$$I_3(c_1, c_5) = \min\{e_{1,2}, e_{2,4}, e_{4,5}\} = \min\{some, alot, some\} = some,$$

$$T(c_1, c_5) = \max\{I_1(C_1, C_5), I_2(C_1, C_5), I_3(C_1, C_5)\} = \max\{much, some\} = much.$$

Der gesamte indirekte Effekt aller Ketten von C1 bis C5 ist much.

Je nach der Herangehensweise können die Verbindungen  $w(e_i, e_j) \in W$  zwischen -1 und 1 liegen und entweder als unscharfe Menge oder linguistische Variablen dargestellt werden, wie z.B. in kognitiven Karten von Kornoushenko und Maximov (45).

### 2.1.2. Andere Modifikationen der kognitiven Karten

Weitere Entwicklungen gehen in Richtung des Zusammenwirkens der kognitiven Karten mit der Fuzzy-Logik, bei der die Faktoren linguistische Variable und die Verbindungen Datenbanken von fuzzy-Regeln sind.

#### Verallgemeinernde kognitive Karte

In (46) wurde sogenannte verallgemeinernde kognitive Karte präsentiert. Die verallgemeinernde kognitive Karte stellt ein gerichtetes Kausalnetz des Typs  $G = (E, W)$  dar, wobei  $E$  - die

Menge der Faktoren  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_p\}$ ;  $W$  - die Menge der Verbindungen zwischen denen  $W = \{w(e_i, e_j)\}$ . Jeder Faktor wird  $e_i (i \in I = \{1, 2, \dots, p\})$  bei entsprechender linguistischer Variable  $\langle e_i, T_i, D_i \rangle$  beschrieben, wobei  $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_{m_i}^i\}$  die Term-Menge der linguistischen Werte des Faktors  $e_i$  (die Menge der Zustandstypen),  $m_i$  - Anzahl der Zustandstypen des Faktors  $e_i$ ,  $D_i$  die Menge der Basiswerte des Faktors. Jeder Term  $T_{m_i}^i$  wird durch eine charakteristische Funktion beschrieben. Die Verbindungen zwischen linguistischen Faktorenwerten für jedes Paar der Faktoren werden durch unscharfe Variable beschrieben, die ihrerseits durch unscharfe Menge beschrieben werden (Abbildung 2-5).

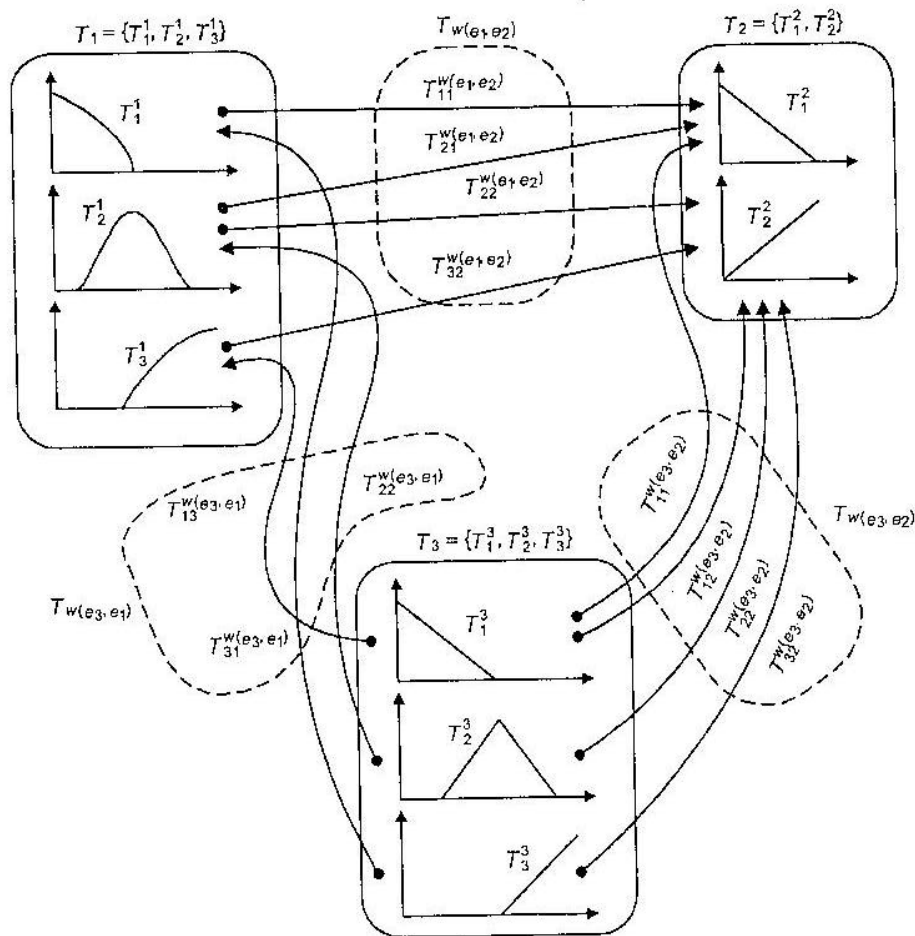


Abbildung 2-5. Beispiel einer verallgemeinernden kognitiven Karte

## Rule-Based FCM

In (47) werden die Rule-Based FCM erörtert. Eigentlich sind die Rule-Based kognitiven Karten ähnlich, aber im Gegensatz zur verallgemeinernden kognitiven Karten werden die Verbindungen zwischen den Faktoren als fuzzy „Wenn-Dann“ (englisch: „If... Then“) Regeln definiert.

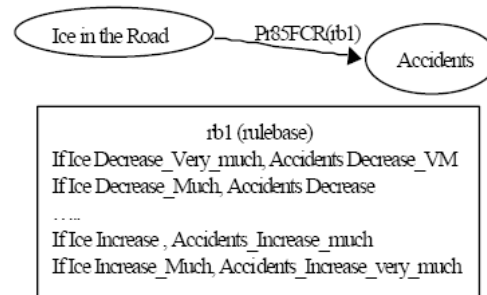


Abbildung 2-6. Beispiel von Fuzzy-Regel

### 2.1.3. Weitere Entwicklung

Eine weitere terminliche Aufzählung der Forschungen zu geben, ist nunmehr nicht möglich, da sich die kognitive Modellierung weltweit auf den unterschiedlichsten Gebieten (bis auf dem technischen) durchgesetzt hat. Sehr aktiv in diesen Bereich sind die USA (39), Russland (1) (41) (48) (46), Spanien (49), Portugal (47).

In Deutschland wird die kognitive Modellierung als mind-mapping Methode zum Verstehen der räumlichen Lern- und Orientierungsprozesse (50) und zur Produktionsplanung benutzt (51).

## **2.2. Entwicklungsmethodik, Simulation und Analyse eines kognitiven Modells zur Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehlern**

Nachfolgend werden die Methodik und die rechentechnische Simulation der kognitiven Karten für die Gussstückqualitätsprobleme dargestellt. Mittels dieser Methodik kann man den Prozess der Modellbildung, Simulation und Analyse des Modells beschreiben. In dieser Methodik verwendet man spezielle Techniken, die die Einflusswichtung einzelner Faktoren auf die Endqualität ermöglichen zu dechiffrieren und alle Prozesse sichtbar und transparent zu machen. Somit werden durch die Simulation erfolgreiche oder unerwartete Ergebnisse der Managemententscheidung aufgezeigt. Durch die Analyse können nicht nur bekannte und direkte Wirkungen, sondern auch nur vermutete und indirekte Wirkungen sichtbar gemacht werden. Ebenfalls kann man mittels folgenden Techniken Fehlerarten eindeutig erkennen, deren Ursachen erforschen und Maßnahmen zur Vermeidung ableiten und vorhersagen.

Die Methodik besteht aus den folgenden festgelegten Stufen (52):

- 1) Auswahl der Faktoren, die gewisse Ereignisse, Handlungen, Größe oder Ziele charakterisieren können.
- 2) Feststellung von Einflussgrößen paarweise zwischen jeden Faktoren.
- 3) Bildung der kognitiven Karte
- 4) Simulation
- 5) Analyse und Deutung.

Die detaillierte Methodik kann mittels eines Sequenzdiagramm (Abbildung 2-7) dargestellt werden. In dieser Methodik sind zwei Berechnungsalgorithmen der Simulation vorgesehen: in Matrizenform und mittels Impulsprozess. Die Matrizenform wird für die Berechnung der klassischen kognitiven Karten angewendet, wo alle Faktoren und Verbindungen qualitativ beschrieben werden und im Wertebereich von -1 bis 1 liegen (wie im Punkt 2.1.2. nach Roberts, Axelroad, Kosko). Die Berechnung der Impulsprozesse wird für die Berechnung der funktionellen kognitiven Karten vorgeschlagen, wo die Verbindungen zwischen den Faktoren als Funktionen dargestellt werden können, aber die Faktorenwerte sollen ebenso im Wertebereich von -1 bis 1 liegen.

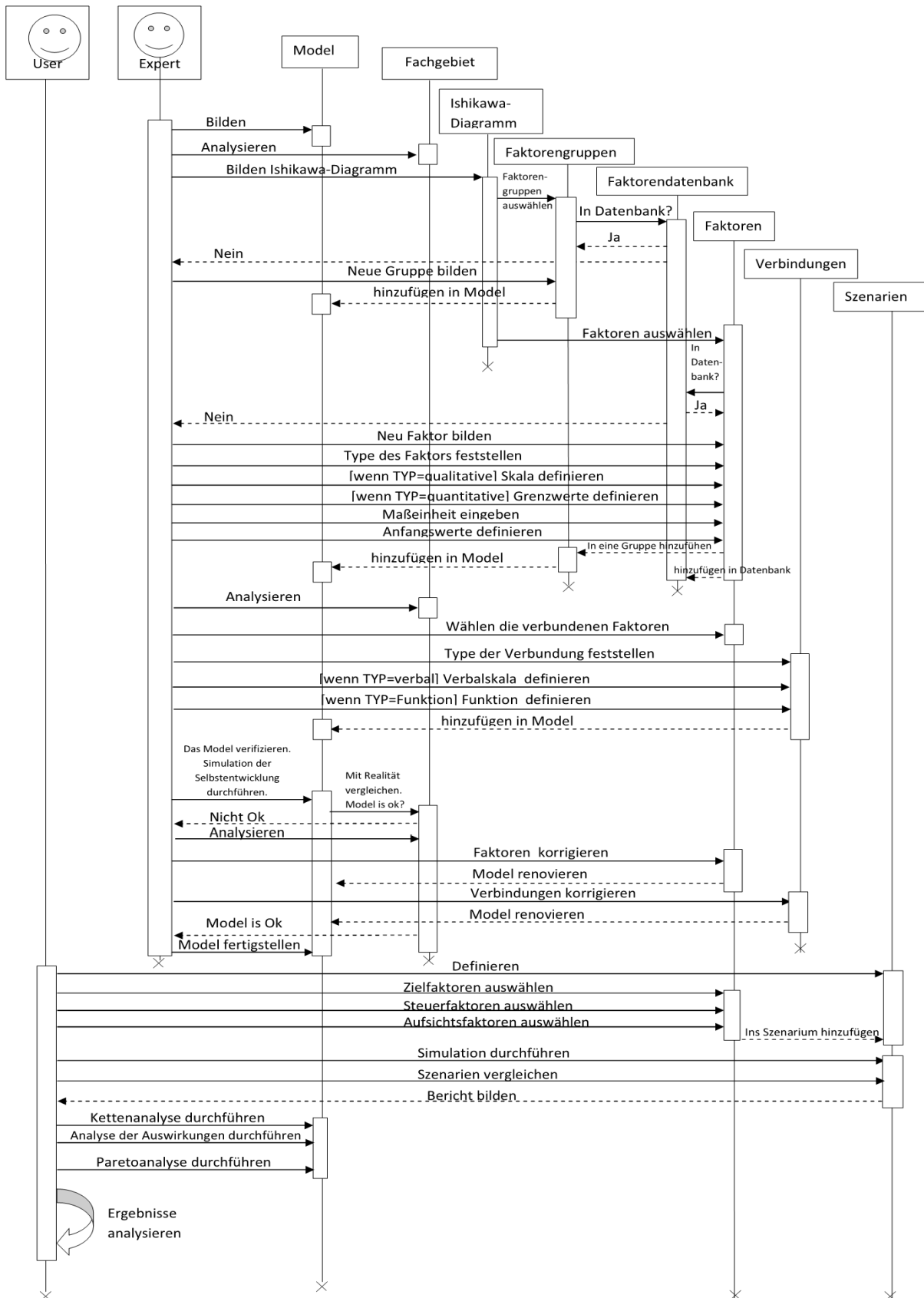


Abbildung 2-7. Sequenzdiagramm

In der Methodik wird vorgeschlagen, dass das Modell von Expert/Analytiker geschaffen und geprüft werden soll. Das Modell darf nicht vom Benutzer geändert werden. Der Benutzer darf das Modell untersuchen, sowie Analysen und Simulationen durchführen.

### **2.2.1. Modellbildung einer Situation**

Die Situation (kommt vom lateinischen «situs» - Stelle, Stellung, Sitz) ist ein sehr komplexer und vielseitiger Begriff. Zum Beispiel in (53) ist die Situation ein augenblicklicher Zustand. Mit anderen Worten bezeichnet der Begriff die Gebundenheit an Gegebenheiten und Umstände.

Aus Sicht jeder einzelnen Person hat die Situation subjektive Färbung, seine individuelle Wahrnehmung des Milieus. Nach (54) bildet die Wahrnehmung einer Person einen Ausschnitt des Milieus ab.

Wenn man in einer kognitiven Karte von einer Situation spricht, dann meint man die Situation aus der Sicht der Analytiker oder der Gruppe von Analytikern, die das Modell schaffen.

Ein kognitives Modell einer konkreten Situation besteht aus Faktoren, Verbindungen zwischen den Faktoren und Anfangswerte der Faktoren. Damit beschreiben die Faktoren eine vollständig vorgegebene Situation nach Meinung der Person, die das Modell schafft.

### **2.2.2. Analyse des Fachgebiets**

Um ein kognitives Modell zu schaffen, muss eine kognitive Analyse des Fachgebiets durchgeführt werden. Die kognitive Analyse ist eine aufeinanderfolgende Kausalstrukturierung der Information über die im zu erforschenden System stattfindenden Prozesse. Die Strukturierung muss dabei nach folgendem Schema (35) durchgeführt werden:

- 1) Jedes im System auftretende Ereignis wird von bestimmten Ursachen hervorgerufen. Diese Ursachen gehen einher mit der Bewegung von Stoffströmen (z. B. Waren, Geld, Ressourcen, usw.) und immateriellen Strömen (z. B. Informationswechselwirkungen, Wärme, usw.). Die Bewegung der Ströme kann mit Hilfe von Kausalwechselwirkungsketten beschrieben werden. Die Darstellung der Ströme ist ein erster Schritt zur kognitiven Analyse des Systems.
- 2) Jeder aufgezeigte Strom muss mit Hilfe der Gesamtheit der Faktoren beschrieben werden. Die Verbindung dieser Gesamtheiten bildet die Menge von Faktoren, mit denen die Prozesse des Systems beschrieben werden können.



- 3) Die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren werden durch das Aufzeigen der Kausalketten eines jeden Stroms bestimmt. Alle Ketten können mit der „wenn-dann“-Struktur beschrieben werden. Die Faktoren des ersten Teils (wenn) beeinflussen die Faktoren des zweiten Teils (dann). Beispielsweise, im Fall von klassischen kognitiven Karten kann der Einfluss verstärkend (positiv) oder hemmend (negativ) sein. Er kann aber auch veränderliche Vorzeichen, Fuzzy-Set oder Funktion (je nach den zusätzlichen Bedingungen) aufweisen.

Für das Schaffen des vollständigen Modells muss man alle Möglichkeiten benutzen, damit alle wichtigen Aspekten nicht unberücksichtigt bleiben.

Nach (55 S. 31) findet man folgende Möglichkeiten:

- 1) Diskussion. Das kognitive Modell soll von einem Analytiker oder einer Gruppe von Analytikern auf der Basis des eigenen Wissens, der Erfahrungen und eigener Vorstellungen des Problems geschaffen werden. Die Analytiker dürfen keine Referenzdaten oder zusätzliche Literatur benutzen, damit das Modell nur auf ihrer eigenen Vorstellung von der Problemsituation besteht.
- 2) Dokumentenanalyse. Für das Erschaffen des Modells können unterschiedliche Dokumente analysiert werden. Das ist eine zeit- und kraftraubende Aufgabe, weil sich die aus unterschiedlichen Quellen gesammelten Daten, Zahlen oder Fakten einander dokumentarisch bestätigen oder widersprechen können. Die widersprechenden Daten sollen zuordnet werden, dafür benutzt man spezielle Technologien (56).
- 3) Befragung. Befragung von Experten oder stichprobeweise Befragung. Die Aufgabe der Experten oder befragten Personen besteht darin, die kausalen Verbindungen im Problemgebiet zu bewerten. Dafür verwendet man beispielsweise die Verfahren des paarweisen Vergleichs. Nach der Befragung müssen die individuellen Meinungen der verschiedenen Experten zusammengesetzt werden. Für die Zusammensetzung können situationsabhängig unterschiedliche Methoden benutzt werden: von einfacher Bildung der Durchschnittswerte der Expertenmeinungen bis zu speziellen Methoden für Kollektiventscheidungen.

Zur vollständigen Erfassung des Problemgebietes empfiehlt man, die Kombination aller drei möglichen Mittel zu benutzen. Dann wird das kognitive Modell eine „kollektive Weisheit“ der Gruppe der an der Diskussion Beteiligten, der befragten Experten und Autoren (57).

### 2.2.3. Ermittlung der Faktorengruppen und Faktoren

Um die Ursachen der Gussfehlerentstehung zu systematisieren und in allen Ebenen des technologischen Prozesses die Gussfehlerursachen oder die Missstände der Gussstückqualität aufzudecken, kann das so genannte Ishikawa- oder auch Ursache-Wirkungs-Diagramm benutzt werden (siehe Punkt 1.1.1. Sieben elementare Qualitätstechniken, Ishikawa-Diagramm). Dies liefert als graphische Darstellung eine sogenannte Fischgräten-Struktur (58). Es stellt letztendlich ein graphisches Ordnen der Faktoren dar, die das zu analysierende Objekt beeinflussen.

Um alle Faktoren zu berücksichtigen, können zwei Ishikawa-Diagramme geschaffen werden, damit das Problem unter den unterschiedlichen Gesichtswinkeln betrachtet werden kann. Das Erste kann aus allen Faktoren (4 Hauptanforderungsgruppen: Gefüge, mechanische Eigenschaften, Abmessungen und Oberfläche) bestehen, mit denen die Gussstückqualität bewertet werden kann (Abbildung 2-8). Das Zweite kann aus den Faktoren (4 Gruppen von Ursachen der schlechten Gussstückqualität: Legierungseigenschaften, Kokilleneigenschaften, Parameter des Prozessablaufs, Personal und Anlagen) bestehen, von denen die Gussstückqualität abhängig ist (Abbildung 2-9). Die Hauptfaktorengruppen können in weitere Gruppenebenen unterteilt werden (59).

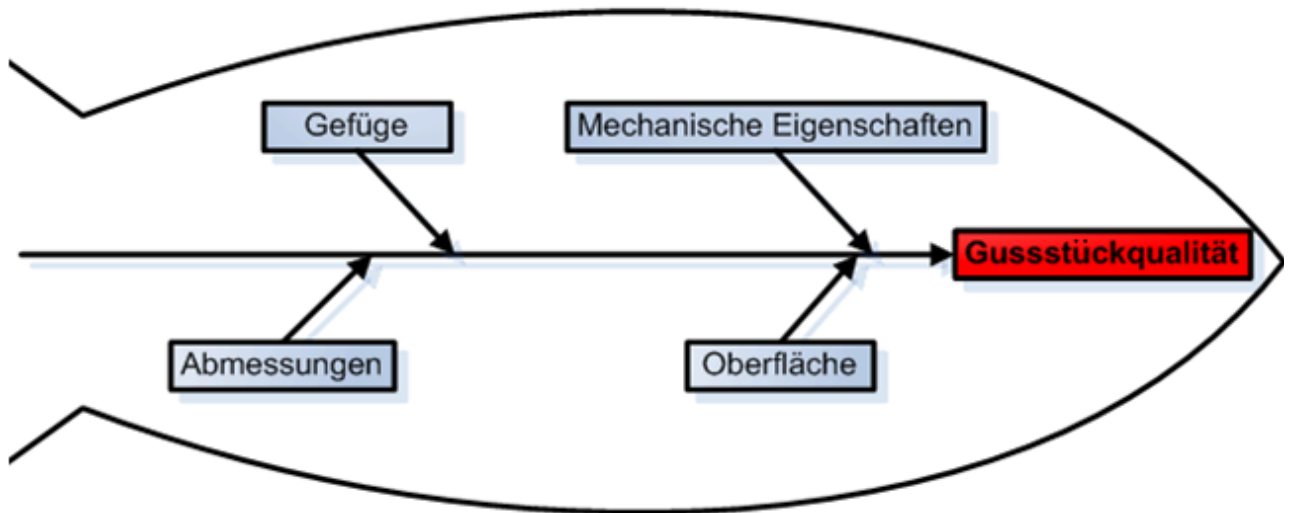


Abbildung 2-8. Gussstückqualitätsbewertungen

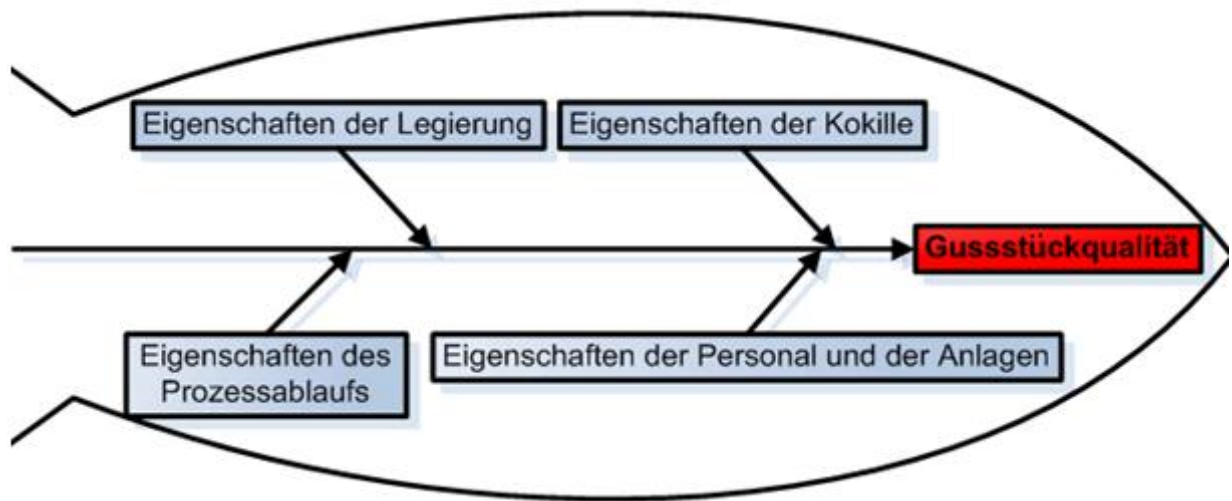


Abbildung 2-9. Ursachen der Gussstückqualität

Nach der Ermittlung der Faktorengruppen, müssen die einzelnen Faktoren ermittelt und definiert werden. Die Definition enthält die Feststellung der Typen, Maßeinheiten und die Anfangswerte der Faktoren.

#### 2.2.4. Definition der Faktorentypen

Man unterscheidet zwischen quantitative und qualitative Faktoren, die notwendig sind, um das kognitive Modell einer Situation zu schaffen.

##### Quantitative Faktoren

Ein quantitativer Faktor ist ein Faktor, der in dieser Formulierung in beliebigen Maßeinheiten bewertet und mit diesen Maßeinheiten genau definiert werden kann. Zum Beispiel das Lebensalter der Menschen oder die Temperatur können als bestimmte Zahlen dargestellt werden. Für die Darstellung von solchen Faktoren wird im kognitiven Modell eine einfache Linienskalierung angewendet.

Die Linienskalierung ist die einfachste Methode der Datenverdichtung in vorgegebenem Definitionsbereich. Die Methode besteht in der Festlegung von minimalen und maximalen Faktorenwerten oder so genannten Referenzpunkten, zwischen denen sich der Faktorenwert während der Simulation ändern kann (41). Die Verhältnisse zwischen den Zahlen bleiben erhalten. Die Linien-

skalierung funktioniert sehr effektiv, wenn die Daten sich gleichmäßig innerhalb eines Definitionsbereichs ausbreiten. Die Anwendung der Linienskalierung in nicht gleichmäßig ausgebreiteten Daten oder in Daten mit Überschwingungen führt zur schlechten Datenverteilung im engen Bereich (60).

Wenn der Vorbehalt in Formel 2-1 stimmt, dann ist die Linienskalierung möglich.

$$\begin{cases} \min(v_{1..n}) \succ (\bar{v} - \lambda \sigma_v) \\ \max(v_{1..n}) \prec (\bar{v} + \lambda \sigma_v) \end{cases}$$

Formel 2-1. Vorbehalt der Linienskalierung

wobei

$\max(v_{1..n})$  - Maximalwert des Faktors,

$\min(v_{1..n})$  - Minimalwert des Faktors,

$\bar{v}$  - Mittelwert des Faktors,

$\sigma_v$  - Standardabweichung

$\lambda$  - Zahl der Standardabweichungen vom Mittelwert.

Linienskalierung von  $v$  zu  $s$ , der im Bereich von 0 bis 1 liegt, wird mittels folgender Gleichung (Formel 2-2) berechnet.

$$s = \frac{v - \min(v_{1..n})}{\max(v_{1..n}) - \min(v_{1..n})}$$

Formel 2-2. Linienskalierung

Die Rücktransformation von  $s$  zu  $v$  wird mittels folgender Gleichung (Formel 2-3) berechnet.

$$v = \min + s(\max(v_{1..n}) - \min(v_{1..n}))$$

Formel 2-3. Rücktransformation der Linienskalierung

## Qualitative Faktoren

Ein qualitativer Faktor ist ein Faktor, der in quantitativen Maßeinheiten nicht definiert werden kann. Für die Darstellung von solchen Faktoren werden im kognitiven Modell zwei Skalenarten angewendet: Ordinalskala und Nominalskala.

## Ordinalskala

Die Ordinalskala ist eine Skala, die nur die Reihung (Ordnung) der Variablenwerte enthält und nicht als Zahlen dargestellt wird. Ein Beispiel dazu sind die Kriminalitätsstufen (leichte oder Bagatelldelinquenz, mittlere und schließlich Schwere delinquenz).

Ein Sonderfall der Ordinalskala ist die Oppositionsskala. Die Oppositionsskala basiert auf den antagonistischen Begriffen. In europäischen Sprachen gibt es mehrere hundert Paaren von Gegenwörtern, zum Beispiel oft – selten. Mittels Oppositionsskala kann man verschiedene Annäherungen zu beide Polen bewerten, z.B. sehr kalt – kalt - befriedigend – heiß – sehr heiß.

In (61) wurde ein Universalmittel für die verbale Bewertung von Zeichenerscheinung des Faktors angeboten. Die Werte ändern sich innerhalb der Skala L von Minimum  $R_{MIN}$  bis Maximum  $R_{MAX}$  der Zeichenerscheinung:  $L=[R_{MIN}, R_{MIN}+1, ..., 0, ..., R_{MAX}-1, R_{MAX}]$ , wo L-Skala, R – Abstufung von Zeichenerscheinung des Faktors.

Zum Beispiel, Skala L hat 6 Erscheinungsstufen der Zeichen in positiven Bereich und 6 Erscheinungsstufen der Antizeichen in negativen Bereich:  $L=[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]$ . Diese Stufen sind in Tabelle 2-1 gezeigt.

Abstufe	Abkürzung	Bezeichnung	Linguistische Variable
-6	<i>HAZ</i>	Höchste Antizeichenerscheinung	völlige Gewissheit im Fehlen von Zeichenerscheinung
-5	<i>FHAZ</i>	Fast höchste Antizeichenerscheinung	fast völlige Gewissheit im Fehlen von Zeichenerscheinung
-4	<i>SAZ</i>	Sehr Antizeichenerscheinung	Vollständiges Fehlen von Zeichenerscheinung
-3	<i>FSAZ</i>	Fast sehr Antizeichenerscheinung	Fast vollständiges Fehlen von Zeichenerscheinung
-2	<i>AZ</i>	Antizeichenerscheinung	Fehlen von Zeichenerscheinung
-1	<i>FAZ</i>	Fast Antizeichenerscheinung	Fast Fehlen von Zeichenerscheinung
0	<i>NZ</i>	Neutral Zeichenerscheinung	mittlere Zeichenerscheinung (keine Information)
+1	<i>FZ</i>	Fast Zeichenerscheinung	größer als mittlere Zeichenerscheinung
+2	<i>Z</i>	Zeichenerscheinung	Zeichenerscheinung
+3	<i>FSZ</i>	Fast sehr Zeichenerscheinung	Fast Sehr starke Zeichenerscheinung
+4	<i>SZ</i>	Sehr Zeichenerscheinung	Sehr starke Zeichenerscheinung
+5	<i>FHZ</i>	Fast höchste Zeichenerscheinung	Fast Höchststufe von Zeichenerscheinung
+6	<i>HZ</i>	Höchste Zeichenerscheinung	Höchststufe von Zeichenerscheinung

Tabelle 2-1. Linguistische Darstellung der Abstufungen einer Ordinalskala

Soweit alle Faktoren in unserer Methodik im Wertebereich von -1 bis 1 liegen sollen, müssen die mittels einer Ordinalskala beschriebenen Faktoren zum Intervall von  $[-1,1]$  nach folgende spezielle Regeln der Zuweisung von Zahlen auch zugewiesen sein (62):

- ☐ Unterschiedliche Merkmalausprägungen werden unterschiedlichen Zahlen zugeordnet (Exklusivität).
- ☐ Es existiert eine Zahl für jede beobachtete oder potentiell bestehende Merkmalausprägungen (Exhaustivität).
- ☐ Die Zahlen repräsentieren Unterschiede einer bestimmten Größe in Bezug auf die Merkmalausprägung (Vergleichbarkeit).

## Nominalskala

Die Nominalskala (oder Nennskala) ist eine Skala, die mögliche Ausprägungen unterscheidet, die nicht in eine Rangfolge gebracht werden können. Zum Beispiel, Geschlecht (männlich, weiblich), Religionszugehörigkeit (evangelisch, katholisch, muslimisch).

Die Nominalskala kann auch als Zahlenskala dargestellt werden. Die Zahlenbedeutung ist irrelevant, weil sie nicht auf Qualitäts- oder Rangmerkmale hinweist. Die Zahlen auf Nominalskalenniveau markieren verschiedene Qualitäten oder Kategorien der Variable. Als Beispiel für eine Zahl-nominalskala kann man die Rückennummern einer Fußballmannschaft anführen. Jeder Fußballspieler hat eine eigene einzigartige Rückennummer. Diese Nummern benutzt man, um die Spieler voneinander zu unterscheiden, aber nicht in eine Rangfolge zu bringen.

Weil die Faktoren in unserer Methodik im Wertebereich von -1 bis 1 liegen sollen, muss jede Nominalskala auch zum Intervall von  $[-1,1]$  gewandelt werden. Man benutzt dafür folgende spezielle Regeln der Zuweisung von Zahlen (62):

- ☐ Unterschiedliche Merkmalausprägungen werden unterschiedlichen Zahlen zugeordnet (Exklusivität).
- ☐ Es existiert eine Zahl für jede beobachtete oder potentiell bestehende Merkmalausprägungen (Exhaustivität).

### 2.2.5. Definition der Maßeinheiten und Anfangswerte der Faktoren

Quantitative Faktoren können in Maßeinheiten angegeben werden, die beim Messen als quantitative Bewertung des Wertes anderer Größen der gleichen Art dienen. Die Maßeinheiten sollen vor der Bestimmung der Anfangswerte definiert werden.

Bei der kognitiven Modellierung erfolgt die Beschreibung der Eingangssituation mittels Anfangswerten der Faktoren. Die Anfangswerte sind die Werte, die die Faktoren am Anfang der Analyse haben. Die Anfangswerte sollen aus dem Definitionsbereich des Faktors ausgewählt werden.

Auf der Basis der Anfangswerte des Modells können durch Simulation der Selbstentwicklung die Prognosewerte der Faktoren ermittelt werden (siehe Punkt 2.2.9. Selbstentwicklung des Modells).

### 2.2.6. Verbindungen zwischen den Faktoren

#### Qualitative Verbindungen

Bei der klassischen kognitiven Herangehensweise wird die Wechselwirkungskraft zwischen den Faktoren mittels qualitativer Bewertungen (wie z. B. „bedeutend“, „mäßig“, „schwach“, usw.) beschrieben. Die Gesamtheit der qualitativen Bewertungen wird in einer Zahlenskala im Intervall  $[0,1]$  zusammengefasst. Jede Bewertung entspricht einer Skalazahl. Das Bogengewicht  $w_{ij} \in [0,1]$  zeigt die Einflussstufe des Faktors  $V_i$  auf den Faktor  $V_j$  entsprechend der  $[0,1]$ -Skala. Unter Berücksichtigung der Einflussrichtung hat jeder Bogen ein Gewicht im  $[-1,1]$ -Intervall. Positiver Einfluss bedeutet, dass eine Vergrößerung des Faktors  $V_i$  zur Vergrößerung des Faktors  $V_j$  führt bzw. eine Verringerung des Faktors  $V_i$  führt zur Verringerung des Faktors  $V_j$ . Wenn der Einfluss des Faktors  $V_i$  auf den Faktor  $V_j$  positiv ist, wird der Bogen  $a_{ij}$  mit positiven Gewicht  $+w_{ij}$  von Knoten  $V_i$  zu dem Knoten  $V_j$  gezogen. Negativer Einfluss bedeutet, dass eine Vergrößerung des Faktors  $V_i$  zur Verringerung des Faktors  $V_j$  führt oder eine Verringerung des Faktors  $V_i$  führt zur Vergrößerung des Faktors  $V_j$ .

Alle Einwirkungen bilden die Adjazenzmatrix  $A = \|a_{ij}\|$  mit der Dimension  $n * n$ , wobei die Zahlenspalte und die Zahlenzeile dem jeweiligen Grafenknoten entsprechen. In jede Zelle wird eine Zahl der Skala (oder z. B. eine Funktion  $f(x)$  im Falle eines funktional-gewichteten Grafen) eingeschrieben, die das Vorhandensein von Wirkungen von Spalte zu Zeile bestimmt.

Die Nutzung der qualitativen Bewertungen gibt die Möglichkeit, die Zusammenhänge ohne wissenschaftliche Bestätigung zu beschreiben. Diese Zusammenhänge können als eine Formalisierung des Expertenwissens über das Systemverhalten angesehen werden.

## Funktionale Verbindungen

Falls die Verbindungen zwischen Faktoren gut bekannt sind, dann muss eine Funktion vorhanden sein, die diese Verbindung glaubwürdig beschreiben kann. Deswegen werden auch die funktionellen Verbindungen in der vorgeschlagenen Methodik genutzt. In diesem Fall spricht man von funktional-gewichteten Grafen. Jede Einwirkung des Faktors  $V_i$  auf den Faktor  $V_j$  kann als Funktion  $f(x)$  dargestellt werden, wobei  $x$  der Faktorwert im betrachteten Zeitpunkt ist. In diesem Fall werden sogenannte funktionale kognitive Karten benutzt.

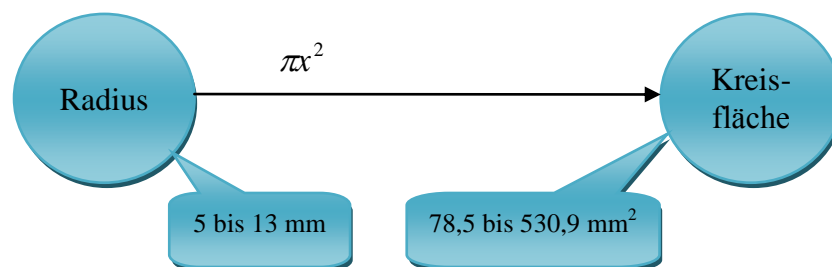


Abbildung 2-10. Beispiel der funktionalen Verbindung

Wenn es im Modell mindestens eine funktionelle Verbindung gibt, dann ist es nicht möglich, Zeitprozesse in Matrixform zu berechnen. Die Berechnung der Simulation soll in diesem Fall mittels Berechnung der Impulsprozesse durchgeführt werden. Alle verbalen qualitativen Verbindungen werden in lineare Funktionen  $f(x)=k*x$  umgesetzt, wobei  $k$  ist Bewertung der Verbindung  $[-1; 1]$ ,  $x$  ist Wert des Faktors  $V_i$ . Im Beispiel der qualitativen Verbindung: «Das beste Wetter (mit Innenwert 1) kann nie zur besten Laune führen, wenn die Anfangstendenz auf 0 gestellt ist» (Abbildung 2-11).



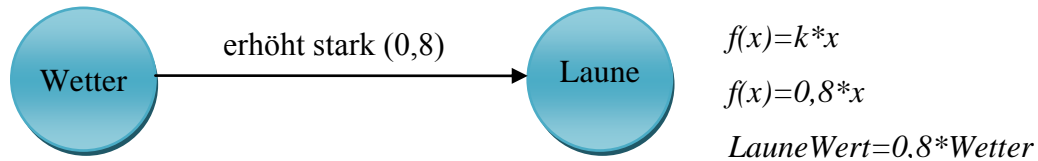


Abbildung 2-11. Beispiel der qualitativen Verbindung

Für die Beschreibung komplizierter Beziehungen zwischen Faktoren können abschnittsweise definierte Funktionen benutzt werden. Abschnittsefunktionen sind die Funktionen, die auf den Teilintervallen des Definitionsbereichs durch verschiedene Terme definiert werden.

Wenn es mehrere vorgegebene Punkte der Formelabwechslung  $x_1 < x_2 < \dots < x_n$  gibt, dann soll normalerweise die Abschnittsefunktion für jedes Intervall getrennt  $(-\infty; x_1), (x_1; x_2); \dots (x_n; +\infty)$  bestimmt werden. Beispiel einer abschnittweisen Funktion:

$$f(x) = \begin{cases} f_0(x), & x < x_1 \\ f_1(x), & x_1 < x < x_2 \\ \dots & \\ f_n(x), & x_n < x \end{cases}$$

Formel 2-4. Beispiel einer abschnittweisen Funktion.

Auf der Abbildung 2-12 findet man ein Beispiel der Anwendung der abschnittweisen Funktionen in kognitiven Karten.

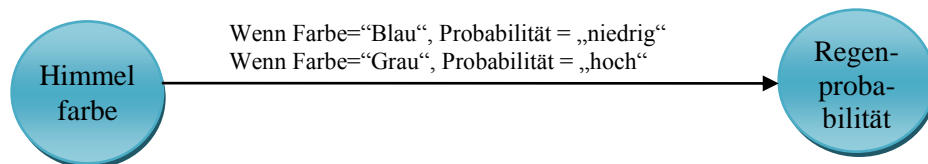


Abbildung 2-12. Beispiel der Anwendung der abschnittweisen Funktion

## 2.2.7. Verifizierung des Modells

Die Verifizierung des Modells soll mittels Simulation der Situationsselbstentwicklung (siehe Paragraph 2.2.9. Selbstentwicklung des Modells) und den Vergleich von Simulationsergebnissen mit statistischen Erhebungen im Unternehmen durchgeführt werden. Nach dem Vergleich treffen die

Experten des Unternehmens die Entscheidung über die Glaubwürdigkeit des Modells. Wenn die Ergebnisse die Anforderungen der Experten nicht erfüllen, dann soll eine Korrektur des Modells durchgeführt werden. Man kann die Angaben, Anfangswerte der Faktoren oder die Verbindungen zwischen ihnen korrigieren. Manchmal soll die Struktur des Graphs des Modells auch verbessert werden.

### **2.2.8. Vorbereitung der Szenarien für die Simulation**

Das kognitive Modell wird mit entsprechenden Algorithmen in eine rechnerlauffähige Software umgesetzt. Diese wird genutzt, um Fehlerarten eindeutig zu erkennen, deren Ursachen zu erforschen und Maßnahmen zur Vermeidung abzuleiten und vorherzusagen. Dabei sind Simulationen mit Hilfe unterschiedlichster Szenarien möglich.

Szenario – ist die Reihenfolge der Steuerungen zur Erreichung des Ziels, oder

Szenario – ist die Gesamtheit von Ziel-, Steuer-, Prozess- und Aufsichtsfaktoren, die die Problemsituation beschreiben:

$S = \langle N, Z, C, P, W \rangle$ , wobei

S – Szenario,

N - Name,

Z – Gesamtheit der Zielfaktoren,

C - Gesamtheit der Steuerfaktoren,

P – Gesamtheit der Prozessfaktoren

W – Gesamtheit der Aufsichtsfaktoren.

Zur Durchführung der Simulationsszenarien sollen von allen Faktoren Zielfaktoren, Steuerfaktoren ausgewählt werden. Alle anderen Faktoren, die nicht zu den Ziel- oder Steuerfaktoren gehören, nennt man Prozessfaktoren.

#### **Zielfaktoren**

Zielfaktoren sind die Faktoren, deren Dynamik sich in die gewünschte Richtung bewegen soll. Das gesamte Ziel des Modells bildet sich aus einer Reihe von Faktoren heraus. Zum Beispiel, im Fall der Gussstückqualität soll jeder Faktor, der einige Gussfehler beschreibt, in der Richtung der Verringerung der Gussfehlerzahl streben. Die Zielwerte werden als Zielvektor Z definiert und zeigen den angestrebten Endpunkt der Modellentwicklung.

Die graphische Darstellung des Zielvektors wird bei den Simulationsergebnissen zum anschaulichen Vergleich der Effizienz der Szenarien genutzt. Das Vorhandensein des Zielvektors führt zur Lösung von Aufgaben der Polyoptimierung. Die Effizienz der Szenarien kann auch durch die Berechnung der Gesamtfehler oder die Entscheidungsregeln der Entscheidungstheorie ermittelt werden (siehe Punkt 2.2.11. Analysenwerkzeuge, Effizienz der Szenarien).

## Steuerfaktoren

Das Modell benötigt äußere Steuerungen, falls die Tendenzen der Zielfaktoren in Gegenrichtung streben, d. h. sich vom Ziel entfernen.

Steuerfaktoren sind die Faktoren, mit deren Hilfe man die Prozesse im Modell steuern kann. Alle Steuerfaktoren stellen Vektoren  $g(t)$  dar. Der Vektor charakterisiert den augenblicklichen Steuerungsimpuls zum Zeitpunkt  $t = 0$ . Die Angriffspunkte der Steuerungen können als Matrix  $B$  ( $n \times m$ ) dargestellt werden (wo  $n$  – Gesamt Faktorenzahl,  $m$  – Zahl der Steuerfaktoren). Die Elementen der Matrix  $B$  sind gleich entweder 0 oder 1, wobei 0 keine Steuerung zeigt, und 1 zeigt die Steuerung. Die Kombination der Steuerfaktoren bildet die Strategie der Entwicklung im Rahmen eines Szenariums.

Die Faktoren, die nicht zu den Ziel- oder Steuerfaktoren gehören nennt man Prozessfaktoren. Solche Faktoren sind zur Verbindung der Steuerungen und Ziele geeignet.

## 2.2.9. Selbstentwicklung des Modells

Die Simulation der Selbstentwicklung des Modells ist die Simulation ohne äußere Steuerungen, das heißt, nur unter Berücksichtigung der Anfangsbedingungen der Faktoren, vorgegebene Verbindungen zwischen ihnen und der Modellstruktur.

Im Falle des klassischen kognitiven Modells, wo alle Verbindungen zwischen Faktoren qualitativ beschrieben sind, um Zeitprozesse des Systems zu simulieren, soll ein Übergang vom Grafenmodell  $G(V, A)$  (wobei  $V$  – Grafknoten oder Faktoren,  $A$  – Bogen oder Wechselwirkungen) zu Zeitgleichungen der Faktoren vorgenommen werden.

Für die Beschreibung der Wirkungen zwischen den Faktoren, wird die Adjazenzmatrix  $A = \|a_{ij}\|$  mit der Dimension  $n \times n$  benutzt, wo  $a_{ij}$  die Wirkung des Faktors  $F_i$  auf den Faktor  $F_j$  ist, wo  $n$  die Faktorenzahl ist.

Für die Simulationsberechnung der Selbstentwicklung ist die Matrizenform sehr bequem zu benutzen:

$$x(t) = (I_N + A + A^2 + \dots + A^t)x(0)$$

Formel 2-5. Selbstentwicklung, Matrizenform

wobei gilt:

$x(t)$  - der Vektor, der die Dynamik der Selbstentwicklung charakterisiert,

$I_N$  - die Einheitsmatrix  $n \times n$ ,

$x(0)$  - der Vektor, der die Anfangsbedingungen aller Faktorenwerte charakterisiert.

Wenn das Modell auf der Basis von funktionellen Graphen gebildet wird, dann soll der Übergang von der Matrix zur Berechnung der Impulsprozesse durchgeführt werden. Dadurch soll die Verifizierung und die Simulation des Modells mittels Kettenberechnung durchgeführt werden. Die Momente der diskreten Zeit werden als  $t$  bezeichnet,  $t = 0, 1, 2 \dots$ . In diesem Fall stellt sich die Wirkung des Faktors  $F_i$  auf den Faktor  $F_j$  als Funktion  $f_{ij}(F_i)$  dar, wo  $F_i$  – Wert des Faktors  $i$ .

In diesem Fall besteht der Prozess der Simulation der Selbstentwicklung aus folgenden Etappen:

1. Ermittlung von Einflussketten (Wege) für jedes Paar der Faktoren  $F_i$  und  $F_j$  aus der Gesamtheit aller Faktoren des Modells  $F$ .

Zuerst sollen alle möglichen Wege zwischen alle Paaren der Faktoren ermittelt werden. Weg ist eine Folge von Kanten im Graf, in der der Endknoten jeder Kante der Startknoten der folgenden Kante (auch Kantenzug genannt) ist. Die Zahl der Kanten in der Folge ist die Weglänge. Wenn sich alle Knoten des Weges voneinander unterscheiden, wird der Weg auch Pfad genannt, andernfalls heißt er Zyklus. Zur Auffindung aller Wege wird der Algorithmus der Breitensuche (oder auch der Wellenalgorithmus) angewendet. Bei der Breitensuche werden zunächst alle Nachbarknoten des Startknotes verarbeitet und erst danach geht der Algorithmus um eine Ebene tiefer (Abbildung 2-13).

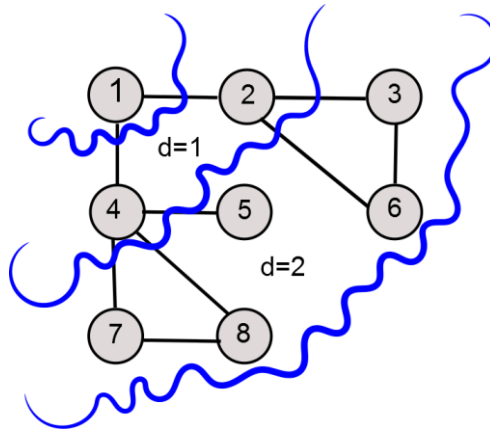


Abbildung 2-13. Graphische Darstellung des Wellenalgorithmus

2. Berechnung des Endeinflusses der Anfangswert  $F_i^0$  für jede einzelne Kette zwischen alle Faktoren  $F_i$  und  $F_j$ .

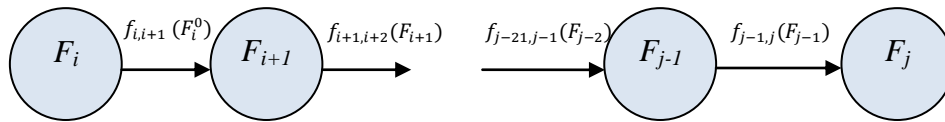


Abbildung 2-14. Berechnung des Endeinflusses der Kette

Der Wert jedes Faktors in der Kette wird als Funktion  $f_{j-1,j}(F_{j-1})$  iterativ nach einander berechnet. Die erste Funktion in der Kette  $f_{i,i+1}(F_i^0)$  wird vom Anfangswert des ersten Faktors berechnet. Alle folgenden Faktorenwerte werden der Reihe nach in der Kette aus dem Anfangswert des ersten Faktors kalkuliert (Abbildung 2-14).

3. Summierung aller ankommenden Impulse.

Der gesamt ankommende Impuls der Knoten  $F_j$  ist die Summe der ankommenden Wirkungen von  $k$  ankommenden Ketten und Anfangswert des Endfaktors  $F_j^o$ .

$$F_j = \sum_{k \in I} f_{(j,j-1)_k}(F_{j-1}) + F_j^o$$

Formel 2-6. Gesamt ankommender Impuls

wobei gilt:

$I$  ist die Gesamtheit aller ankommenden Ketten im Knoten  $F_j$ ,

$f_{j,j-1}(F_{j-1})$  ist die funktionale Verbindung zwischen den Faktoren  $F_j$  und  $F_{j-1}$ ,

$F_j^o$  ist der Anfangswert des Faktors  $j$ .

Nach der Summierung aller ankommenden Impulse eines jeden Faktors soll der Systemzustand als der Vektor, der die Dynamik der Selbstentwicklung charakterisiert, analysiert werden. Die Modellstruktur und die Anfangsbedingungen können den Systemzustand allein durch die Faktorenwechselwirkungen begünstigen. Der Systemzustand kann sich in Richtung des Ziels verschieben, d. h., die Tendenzen der Zielfaktoren werden sich den gewünschten Werten annähern. Falls die Tendenzen der Zielfaktoren in Gegenrichtung, d. h. sich vom Ziel entfernen, dann benötigt das Modell:

- 1) Zielkorrekturen oder Änderungen der Zielfaktoren,
- 2) Verhaltenskorrekturen, mittels Außensteuerungen, d. h. Steuerentwicklung.

## 2.2.10. Gesteuerte Entwicklung

Gesteuerte Entwicklung des Systems ist die Simulation der Situation unter Einfluss der benutzerdefinierten äußeren Steuerungen. Deshalb müssen, um die Situationsentwicklung des Systems zu simulieren, zuerst die Steuerfaktoren bestimmt werden.

Im Falle des klassischen kognitiven Modells wird die gesteuerte Entwicklung mit Hilfe der Formel 2-7 simuliert, die gleichartig zur Formel 2-5 ist:

$$x(t) = (I_N + A + A^2 + \dots + A^t)x(0) + (I_N + A + A^2 + \dots + A^{t-1})Bg(0)$$

Formel 2-7. Gesteuerte Entwicklung, Matrizenform

wobei

$B$  - Matrix  $n * m$ , die die Angriffspunkte der Steuerungen zeigt  
(0 - keine Steuerung, 1 - Steuerung).

$g(0)$  - Vektor, der den augenblicklichen Steuerungsimpuls zum Zeitpunkt  
 $t = 0$  charakterisiert

Wenn das funktionelle Modell benutzt wird, dann soll, ebenso wie bei Selbstentwicklung, die Berechnung der Impulsprozesse durchgeführt werden. In diesem Fall besteht die Simulation der gesteuerte Entwicklung aus folgenden Schritten:

- 1) Ermittlung von Einflussketten (Wege) für jedes Paar der Faktoren  $F_i$  und  $F_j$  aus der Gesamtheit aller Faktoren des Modells  $F$  (siehe Seite 52).
- 2) Berechnung des Endeinflusses der Anfangswerte  $F_i^0$  für jede Kette zwischen alle Faktoren  $F_i$  und  $F_j$  (ähnlich wie Punkt 2 auf Seite 53).

- 3) Summierung aller ankommenden Impulsen von  $F_i^0$ .

$$F_j = \sum_{k \in I} f_{(j,j-1)_k}(F_{j-1})$$

Formel 2-8. Summierung der Impulse

- 4) Berechnung des Endeinflusses der Steuerung  $F_i^S$  für jede Kette zwischen allen Faktoren  $F_i$  und  $F_j$ . Anfangswert wird nicht betrachtet.
- 5) Summierung aller ankommenden Impulse von  $F_i^S$ .

$$F_j^S = \sum_{m \in L} f_{(j,j-1)_m}(F_{j-1})$$

Formel 2-9. Summierung der Impulse

wobei gilt:

L ist die Gesamtheit aller ankommende Ketten im Knoten  $F_j$ , wo der Anfangsfaktor ein Steuerfaktor ist.

- 6) Berechnung des Gesamtimpulses

$$F_j^g = F_j + F_j^S + F_j^o$$

Formel 2-10. Berechnung des Gesamtimpulses

wobei gilt:

$F_j$  - Endeinflusses der Anfangswert  $F_i^0$  für jede Kette zwischen allen Faktoren  $F_i$  und  $F_j$

$F_j^S$  - Endeinflusses der Steuerung  $F_i^S$  für jede Kette zwischen allen Faktoren  $F_i$  und  $F_j$

$F_j^o$  ist der Anfangswert des Faktors j.

Nach der Simulation der gewünschten Steuerung kann der Systemzustand sich in Richtung des Ziels annähern. Falls die Tendenzen der Zielfaktoren sich in Gegenrichtung verschieben, d. h. sich vom Ziel entfernen, dann muss das Modell der äußeren Steuerungen korrigiert werden.

## 2.2.11. Analysenwerkzeuge

Durch die Analyse des Modells kann man Fehlerursachen eindeutig erkennen, erforschen, Maßnahmen zur Vermeidung ableiten und vorhersagen. Für die Durchführung der Analyse des Modells werden sowohl statische als auch dynamische Methoden realisiert. Zu den statischen Methoden gehört hauptsächlich die visuelle Erkennung der Einflussfaktoren. Zu den dynamischen gehören die

rechnerischen Methoden, z.B. Kettenanalyse, Analyse der Auswirkungen, Pareto Analyse. Ebenfalls kann man die Analyse der Effizienz von Szenarien durchführen.

### **Visuelle Erkennung der Einflussfaktoren**

Für die Strukturanalyse des Modells kann man das Einflussniveau verschiedener Faktoren aufeinander durch die verschiedene Einfärbung sichtbar machen. Durch die Analyse der Einflussfaktoren kann man die Liste sowohl der Einflussfaktoren, die auf die gewählten Faktoren einwirken, als auch der Faktoren, die eine Wirkung von gewähltem Faktor erfahren, ermitteln. Es können verschiedene Einfärbungen vorgesehen werden, die die Entfernung von ausgewähltem Faktor zeigen. Es ist sinnvoll, die Analyse der Einflussfaktoren mittels dieses Werkzeugs beim Experten durchzuführen. Dieses Mittel kann sehr hilfreich bei der visuellen Erkennung der Fehlerursachen oder bei der Ermittlung der Maßnahmen sein. Dieses Werkzeug hilft bei der Arbeit mit großen Modellen, sich schnell im Faktorennetz zu orientieren.

### **Kettenanalyse**

Durch die Kettenanalyse wird die resultierende Wirkung zwischen zwei ausgewählten Faktoren berechnet. Dafür werden alle mögliche Verbindungen (direkte, indirekte) zwischen ausgewählte Faktoren durch den Algorithmus der Breitensuche (siehe Paragraph 2.2.9 Selbstentwicklung des Modells, Algorithmus der Breitensuche) ermittelt. Die Kettenanalyse hilft detailliert auf die Frage zu antworten: wie sind zwei Faktoren miteinander verbunden.

1. Ermittlung von allen möglichen Einflussketten (Wegen) zwischen zwei ausgewählten Faktoren  $F_i$  und  $F_j$  (siehe Paragraph 2.2.9. Selbstentwicklung des Modells, Algorithmus der Breitensuche).
2. Angeben des Anfangswerts des Faktors  $F_i^0$ .
3. Berechnung des Endeinflusses für eine ausgewählte Kette zwischen den ausgewählten Faktoren  $F_i$  und  $F_j$ .

Der gesamte Einfluss des ersten Faktors  $i$  auf den Endfaktor  $j$  ist die Summe der Einflüssen von allen Ketten, die die zwei ausgewählten Faktoren verbinden. Zum Beispiel die Faktoren: Kokillentemperatur und Gefüge sind mittels zweier Ketten verbunden (Abbildung 2-15).



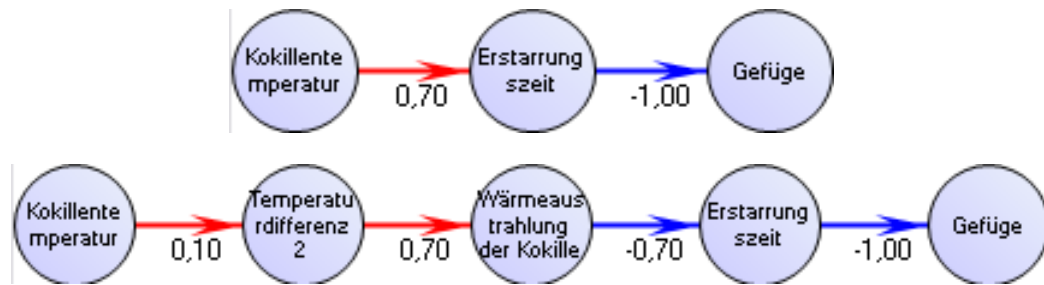


Abbildung 2-15. Beispiel der Faktorenketten

## Analyse der Auswirkungen

Nach der Untersuchung des mathematischen Apparats wurden die Konsequenzen gezogen, so dass es möglich ist, die gesamte Auswirkung des Modells auf den gewählten Faktor zu berechnen.

Im Fall der klassischen kognitiven Karten ist das erste Glied in der Formel 2-5 die transitive Hülle der Matrix  $A$ . Diese transitive Hülle  $Q$  zeigt die Wirkkraft zwischen jedem Paar der Faktoren und kann mittels Formel 2-11 berechnet werden.

$$Q = I^N + A + A^2 + \dots + A^{t \dots}$$

Formel 2-11. Transitive Hülle

Die gesamte Wirkung  $V$  auf den gewählten Faktor  $i$  von allen anderen Faktoren des Modells wird mit der Formel 2-12 berechnet.

$$V = Q^T * E$$

Formel 2-12. Wirkung auf den gewählten Faktor

wobei  $E$  die Matrix  $n \times 1$  ist, der *Nicht-NULL-Wert* gibt den gewählten Faktor an.

Die Wirkung des gewählten Faktors  $i$  auf die Gesamtheit aller Faktoren kann man ähnlich berechnen, dafür benutzt man die untransponierte Matrix der transitiven Hülle  $Q$  (siehe Formel 2-13).

$$V = Q * E$$

Formel 2-13. Wirkung des gewählten Faktors

Wenn das Modell auf der Basis eines funktionellen Graphen gebildet wird, dann soll die Berechnung der Wirkung durch Ketten durchgeführt werden. Der Wirkvektor wird nach folgenden Etappen berechnet (wie im Paragraph 2.2.10. Gesteuerte Entwicklung).

Die gesamte Wirkung auf den gewählten Faktor  $i$  von allen anderen Faktoren des Modells:

1. Ermittlung von Einflussketten (Wegen) von jedem Faktor  $F_j$  und ausgewähltem Faktor  $F_i$  aus der Gesamtheit aller Faktoren des Modells  $F$  mittels Breitensuche (siehe Seite 51).
2. Angeben der Anfangswerte für alle Faktoren  $F_j^0$ . Der Anfangswert des ausgewählten Faktors  $F_i^0$  wird nicht betrachtet.
3. Berechnung des Endeinflusses der Anfangswerte von allen Faktoren  $F_j^0$  für jede Kette auf den ausgewählten Faktor  $F_i$ .
4. Summierung der ankommenden Impulse des Faktors  $F_j$  zum ausgewählten Faktor  $F_i$ , in dem Fall, wenn zwei Faktoren  $F_j$  und  $F_i$  durch mehrere Ketten gekoppelt sind, gilt:

$$F_j = \sum_{m \in L} f_{(j,j-1)_m}(F_{j-1})$$

Formel 2-14. Summierung der Impulse

wobei gilt:

$L$  ist die Gesamtheit aller ankommenden Ketten des ausgewählten Faktors  $F_j$  im Knoten  $F_i$ .

Die Wirkungen werden nach Wirkungsgröße und Vorzeichen sortiert und als Säulendiagramm dargestellt.

Die Wirkung des gewählten Faktors  $i$  auf die Gesamtheit aller Faktoren  $F$ :

1. Ermittlung von Einflussketten (Wegen) vom ausgewählten Faktor  $F_i$  und jedem Faktor  $F_j$  aus der Gesamtheit aller Faktoren des Modells  $F$  mittels Breitensuche (siehe Seite 51).
2. Angeben des Anfangswerts des Faktors  $F_i^0$ . Anfangswerte von anderen Zwischenfaktoren werden als nicht angegebene betrachtet.
3. Berechnung des Endeinflusses des Anfangswert  $F_i^0$  für jede Kette zwischen dem ausgewählten Faktor  $F_i$  und dem Faktor  $F_j$ .
4. Summierung der ankommenden Impulse des ausgewählten Faktors  $F_i^0$  zu allen Faktoren  $F_j$ , im Fall, wenn zwei Faktoren  $F_j$  und  $F_i$  durch mehrere Ketten gekoppelt sind,

$$F_j = \sum_{m \in L} f_{(j,j-1)_m}(F_{j-1})$$

Formel 2-15. Summierung der Impulse

wobei gilt:  $L$  ist die Gesamtheit aller ankommenden Ketten des ausgewählten Faktors  $F_i$  im Knoten  $F_j$ .

Die Wirkungen werden nach Wirkgröße und Vorzeichen sortiert und als Säulendiagramm dargestellt.

Diese Methode ist sehr hilfreich zur Ermittlung der impliziten Wirkungen zwischen den Faktoren sowie für die Ermittlung der richtigen Steuerwerte zur Erreichung des maximalen Erfolgs in der Strategie.

## Pareto-Analyse

Mittels Pareto-Analyse können alle bedeutenden Fehlerursachen im Modell gefunden werden. Das Paretoprinzip lautet: die meisten Wirkungen eines Problems sind häufig nur auf eine kleine Anzahl von Ursachen zurückzuführen. Ein Sonderfall der Paretoprinzip teilt die Gruppen auf 20 und 80%. Dass heißt, dass 80% der Auswirkungen eines Problems häufig auf nur 20% von Ursachen zurückzuführen sind.

Das Paretoprinzip kann mittels Paretodiagramm illustriert werden. Das Paretodiagramm stellt ein Säulendiagramm dar, das die Problemursachen nach ihrer Wertigkeit ordnet.

Wenn  $F = \{F_1; F_2; F_3; \dots; F_n\}$  die Gesamtheit aller Faktoren des kognitiven Modells und  $P = \{(F_1; V_1); (F_2; V_2); (F_3; V_3); \dots; (F_k; V_k); \dots\}$  die Gesamtheit aller Einflüsse auf den gewählten Faktor  $F_j$  sind, wobei  $V_i$  die Einflüssgröße ist, dann lautet das Paretoprinzip: es gibt eine Zahl  $a$  ( $0 < a < 0,5$ ), so genannter Paretopunkt, der die Verteilung der Gesamtheit aller Faktoren auf zwei Gruppen  $K$  und  $M$  ermöglicht, wobei gilt:

$a * n$  ist die Faktorenzahl der Gruppe  $M$ ;

$\sum(K) = (1 - a) * \sum(M)$  ist die Summe der ankommenden Wirkungen von Gruppe  $K$  auf den gewählten Faktor.

Stellt man alle ankommenden Wirkungen als Histogramm dar und ordnen sie nach Abnahme (Abbildung 2-16), dann bildet sich das Histogramm der ansammelten Wirkungen heraus und annähert dazu eine kontinuierliche Funktion  $y = f(x)$  (rote Linie, Abbildung 2-17).

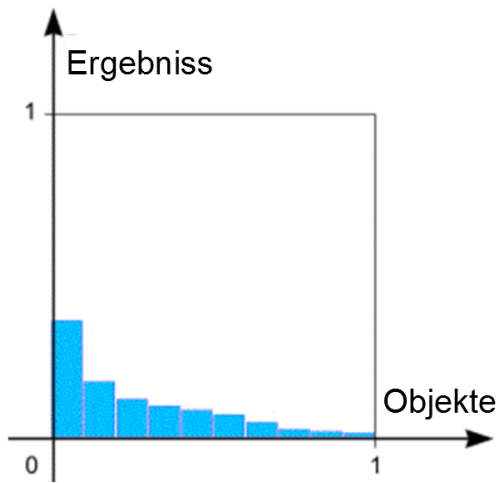


Abbildung 2-16. Histogramm der ankommenden Wirkungen

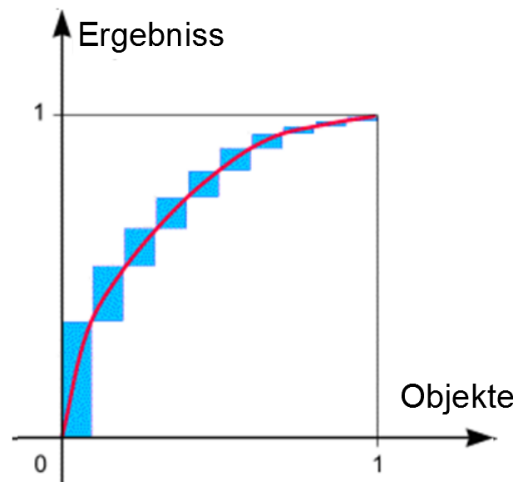


Abbildung 2-17. Funktion  $y = f(x)$

Wenn  $y = f(x)$  die graphische Darstellung der Einflusswerten (Abbildung 2-18) ist, dann zeigt 1 auf der x-Achse  $n$  Einflussfaktoren (alle Einflussfaktoren) und 1 auf der y-Achse zeigt die gemeinsame Wirkung von  $n$  Einflussfaktoren. Der Paretopunkt liegt auf der Gerade  $y = 1 - x$  (siehe Abbildung 2-18, dicke blaue Linie).

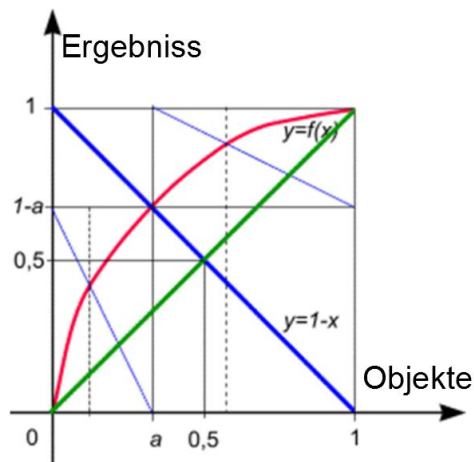


Abbildung 2-18. Paretodiagramm

Der Schnittpunkt der Funktion  $y = f(x)$  und die Gerade  $y = 1 - x$  ist der so genannte Paretopunkt oder Punkt  $a$ , wobei  $f(a) = 1 - a$ . Die Funktion  $y = f(x)$  ist eine monoton steigende konvexe Funktion, weil die Faktoren absteigend sortiert wurden (die Ableitung vermindert sich). Es folgt hieraus, dass die Funktion  $y = f(x)$  immer höher als die Gerade  $y = x$  (Abbildung 2-18, grüne Linie) liegt. Sie treffen zusammen, wenn alle Faktoren die gleiche Wirkung ausüben.

Wenn man die Funktion im Intervall  $(0, a)$  betrachtet, dann kann ein Paretopunkt zweiter Ordnung ermittelt werden (Abbildung 2-18, der Schnittpunkt des roten Funktionsgraphs und dünner blauer Gerade, der Paretopunkt ist mittels gestrichelter Linie gezeigt). Ähnlich kann man auch im Intervall  $(a, 1)$  vorgehen usw.

Der Algorithmus zur Ermittlung des Paretopunktes und der Gesamtheit der Faktoren, die eine maximale Wirkung auf den gewählten Faktor ausüben, besteht aus folgenden Schritten:

1. Ermittlung der Einflussfaktoren  $F_j$  auf den ausgewählten Faktor  $F_i$  und Berechnung ihrer Einflusswerte (siehe Punkt 2.2.11. Analysenwerkzeuge, Analyse der Auswirkungen).
2. Absteigende Sortierung aller absoluten Einflusswerte.
3. Auffindung des Pareto-Punktes.
4. Teilung der Gesamtheit aller Einflussfaktoren in zwei Gruppen, beginnend vom maximalen Einfluss und weiter absteigend solange der Pareto-Punkt erreicht wird.

Gleichfalls kann die Gesamtheit der Faktoren, die vom gewählten Faktor eine Wirkung erfahren, ermittelt werden.

In Rahmen des kognitiven Modells benutzt man dieses Prinzip, um die einflussreichsten Faktoren feststellen zu können. Das angegebene Prinzip erlaubt es, die effektivste Steuerung zu erstellen. Das heißt, es werden mittels der Pareto-Analyse aus vielen möglichen Ursachen eines Problems diejenigen herausgefiltert, die den größten Einfluss haben. Die Wichtigkeit einer Ursache kann direkt aus dem Diagramm abgelesen werden.

### **Kurve der Änderung des Faktorenwertes in der Simulation**

Zur tiefgehenden Analyse des Verhaltens einzelner Faktoren kann man die Kurve der Änderung des Faktorenwertes in der Simulation konstruieren lassen. Damit kann man beobachten, wie sich der ausgewählte Faktor in jedem Schritt der Simulation ändert.

Um die Kurve der Änderung des Faktorenwertes zu konstruieren, benutzt man folgende Schritte:

1. Ermittlung von Einflussketten vom Faktor  $F_j$  bis zum ausgewählten Faktor  $F_i$ , Berechnung ihrer Einflusswerte (siehe Punkt 2.2.11. Analysenwerkzeuge, Analyse der Auswirkungen).
2. Absteigende Sortierung der Einflussketten nach Länge.

- 3 Berechnung des gesamten Einflusses aller Ketten von gleicher Länge (Summe von Einflusswerten).
- 4 Konstruktion der Kurve der Änderung des Faktorenwertes in der Simulation, am ersten Schritt beginnend vom Anfangswert des Faktors, dann nächster Punkt die Summe des vorigen Schritt mit dem gesamten Einfluss der Ketten der Länge=1 ist, usw. bis zur maximalen Länge der Kette.

Man kann das Verhalten des ausgewählten Faktors nach der Simulation der verschiedenen Szenarien (Abbildung 2-19, a) sowie die Änderungen im Verhalten der mehreren Faktoren (b) vergleichen,

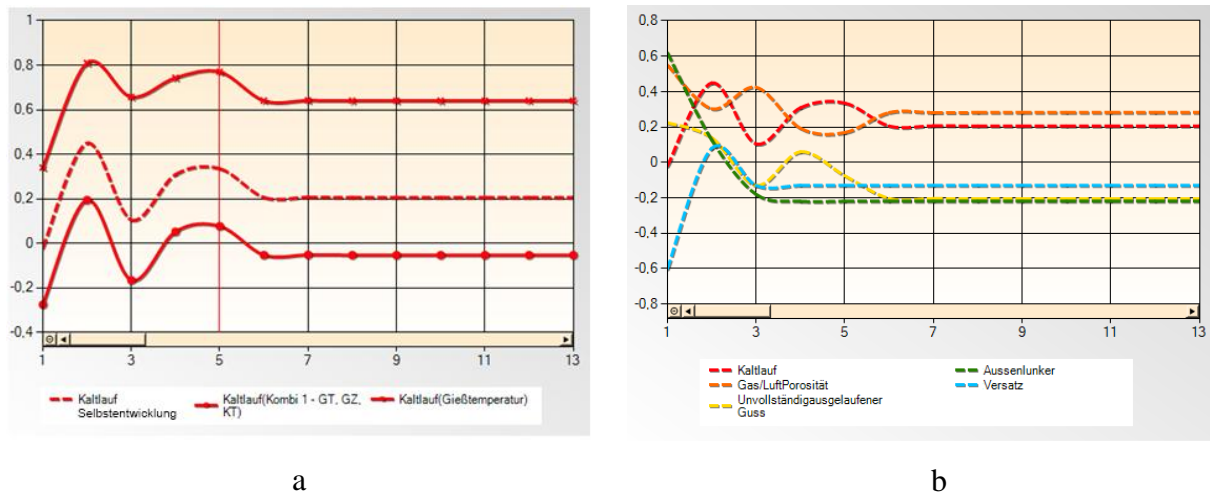


Abbildung 2-19. Kurve der Änderung des Faktorenwertes

a) Änderung des Faktorenwertes „Kaltlauf“ nach Simulation der Selbstentwicklung (gestrichelte Linie), und zwei verschiedene Szenarien, b) Änderung der Werte von 5 verschiedenen Faktoren nach der Simulation der Selbstentwicklung

## Effizienz der Szenarien

Die Effizienz der Szenarien kann durch die Berechnung der Gesamtfehler oder durch die Entscheidungsregeln der Entscheidungstheorie ermittelt werden. Der Gesamtfehler ist die Summe der Abweichungen der Simulationsergebnisse vom vorgegebenen Zielvektor. Im Fall der Gussfehlervorhersage kann die Wirksamkeit des Szenariums mittels der gesamten Gussfehlerzahl verglichen werden.

Im Fall der Entscheidungsregeln werden die vorliegenden Simulationsergebnisse vom Entscheidungsträger in einer Entscheidungsmatrix zusammengeführt. Dann werden durch folgende Entscheidungsregeln nach verschiedenen Kriterien wirksame Szenarien ausgewählt.

Wenn der Entscheidungsträger  $m$  mögliche Strategien  $S_1, S_2, \dots, S_m$  und  $n$  Zielfaktoren  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  ausgewählt hat, dann können die Ergebnisse der Simulation der ausgewählten Strategien als Ergebnismatrix zusammengestellt werden. Der Wert  $a_{mn}$  ist der Wert des Zielfaktors  $n$  nach der Simulation des Szenarios  $m$  (Tabelle 2-2).

	$Z_1$	$\dots$	$Z_n$
$S_1$	$a_{11}$	$\dots$	$a_{1n}$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$S_m$	$a_{m1}$	$\dots$	$a_{mn}$

Tabelle 2-2. Entscheidungsmatrix

Die Entscheidungsmatrix kann in eine so genannte Bedauern-Matrix (oder auch Risiko-Matrix)  $R$  umgestaltet werden. Das Risiko der Entscheidungsträger  $r_{mn}$  des Zielfaktors  $n$  nach der Auswahl des Szenarios  $S_m$  kann man mittels folgender Gleichung berechnen

$$r_{mn} = g_n - a_{mn}$$

Formel 2-16. Das Risiko der Entscheidungsträger

wo

$$g_n = \max_{1 \leq k \leq n} a_{kn} \text{ maximaler Gewinn der Entscheidungsträger.}$$

Der Entscheidungsträger kann seine Entscheidungen nach dem Grad der vorhandenen Information über Problemsituation mit Hilfe von Entscheidungsregeln treffen. Weiter werden einige von diesen Regeln beschrieben:

Maximin-Regel (Wald-Regel)

Die Schlussfolgerung wird nur auf der Basis des ungünstigsten Ergebnisses gemacht, welches bei der Simulation eines Szenariums eintreten kann. Szenarien werden auf Grund der ausschließlich schlechtesten Simulationsergebnisse verglichen. Die Szenarien werden nach der Regel laut Formel 2-17 verglichen, wo  $\alpha$  die ausgewählte Alternative zeigt. Bei dieser Regel bestimmt man zuerst für jedes Szenarium das schlechteste Ergebnis und dann wählt man das Szenarium mit dem höchsten Zeilenminium. Diese Methode ist pessimistisch.

$$\alpha = \max_{1 \leq i \leq m} (\min_{1 \leq j \leq n} a_{ij})$$

Formel 2-17. Maximin-Regel

## Maximax-Regel

Im Gegensatz zur Maximin-Regel ist die Maximax-Regel sehr optimistisch und sucht das Szenarium mit maximalem Gewinn. Hier gilt die Regel laut Formel 2-18.

$$\alpha = \max_{1 \leq i \leq m} (\max_{1 \leq j \leq n} a_{ij})$$

Formel 2-18. Maximax-Regel

## Savage-Regel (Regel des kleinsten Bedauerns)

Die Regel wird als Bedauern-Matrix angewendet. In jeder Zeile der Bedauern-Matrix wird das maximale Risiko ausgewählt und verglichen nach der Formel 2-19.

$$\rho = \min_{1 \leq i \leq m} (\max_{1 \leq j \leq n} r_{ij})$$

Formel 2-19. Savage-Regel

Diese Regel wird normalerweise im Fall der ungünstigsten Prognose benutzt, wenn das Risiko maximal ist. Die Regel gehört zu den sehr pessimistischen Regeln, die benutzt werden, um ein größtes Risiko auf jedem Fall zu vermeiden.

## Hurwitz-Regel

Bei der Hurwitz-Regel wird der Optimismusparameter  $\lambda$  (mit  $0 \leq \lambda \leq 1$ ) benutzt. Der Optimismusparameter drückt persönliche und subjektive Ansichten der Entscheidungsträger auf die Situation aus. Die Szenarien werden nach der Regel laut Formel 2-20 verglichen.

$$\alpha = \lambda * \min_{1 \leq j \leq n} a_{ij} + (1 - \lambda) * \max_{1 \leq j \leq n} a_{ij}$$

Formel 2-20. Hurwitz-Regel

Man wählt das Szenarium aus, wo  $\alpha$  maximal ist. Je größer  $\lambda$ , desto pessimistischer ist die Sicht des Entscheidungsträgers. Das heißt, bei  $\lambda = 1$  stellt die Hurwitz-Regel die pessimistische Maximin-Regel dar, umgekehrt bei  $\lambda = 0$  die optimistische Maximax-Regel.

Um die richtige Regel auszuwählen, ist es wichtig, für die Bewertung der Anwendungsempfehlungen der Entscheidungsregeln die ergänzende Information über die Situation zu sammeln, weil verschiedene Regeln unterschiedliche Bedingungen widerspiegeln, unter denen die Entscheidung getroffen werden soll.



### **Teil 3. Erarbeitung eines automatisierten Entscheidungsunterstützungssystems auf der Basis kognitiver Karten**

#### **3.1. Anforderungen an das automatisierte Entscheidungsunterstützungssystem auf der Basis kognitiver Karten**

Folgende Grundanforderungen an das System wurden auf der Basis von Bedürfnissen der vorgesehenen Hauptnutzer erarbeitet:

1. Das Interface des Systems soll klar und intuitiv sein und soll dem modernen Standard entsprechen.
2. Das System soll verschiedene Methoden des Modellschaffens ermöglichen und bequeme Werkzeuge für den Input des Expertenwissens von Faktoren (Wechselwirkungen, Anfangsbedingungen usw.) besitzen. Das System soll die visuelle Bildung und Aufbereitung der kognitiven Karten ermöglichen.
3. Das System soll die Experten und Benutzer mit den erforderlichen Werkzeugen für die Analyse der kognitiven Karten ausstatten. Es ist notwendig, sowohl statische als auch dynamische Methoden zur Analyse der kognitiven Karten zu realisieren. Die Ergebnisse sollen visuell dargestellt werden und lesbar sein.
4. Das System soll Berichte erstellen und diese in einem weitverbreiteten Datenformat für weitere Anwendung oder für den Ausdruck speichern. Im System sollen flexible Einstellungen der Ausgangsinformation des Berichtes möglich sein.
5. Das System soll die Möglichkeit haben, die Daten des Modells in einem offenen Format für weitere Integration mit anderen Systemen zu importieren sowie zu exportieren.
6. Das System soll die Entwicklung der vorgegebenen Situation durch die Berechnung der Impulsprozesse simulieren und vorhersagen. Die Ergebnisse der Simulation und Vorhersage sollen visuell bzw. graphisch dargestellt werden und lesbar sein.
7. Die Bestandteile des kognitiven Modells sollen möglichst die Begleitinformation (die nicht für die Berechnungen benutzt wird) des Problemgebiets speichern.

8. Im System soll die Wissensbasis mit Information über Faktoren und Verbindungen zwischen ihnen entwickelt werden. Die Struktur der Wissensbasis und der Datei des Modells soll offen sein. Der Zugang zu notwendige Information soll gewährleistet werden.

### 3.2. Architektur des Systems

Entsprechend den obengenannten Anforderungen wurde ein rechentechnisches Programm - analytisches System „Strateg“, entwickelt. Das System ist eine client Applikation, die mittels moderne Software-Plattform Microsoft .NET Framework 4.0 entwickelt wurde. Die Auswahl dieser Plattform ist durch folgende Ursachen begründet: die Unterstützung des modernen Herangehens zur Softwareentwicklung, die Möglichkeiten mit neuen Technologien zu arbeiten (XML, XSLT, SOAP usw.), der großen Anzahl der Datenzugriffswerkzeuge, das Vorhandensein der objektorientierten Programmiersprache C#. Die Softwarearchitektur ist auf der Abbildung 3-1 dargestellt.

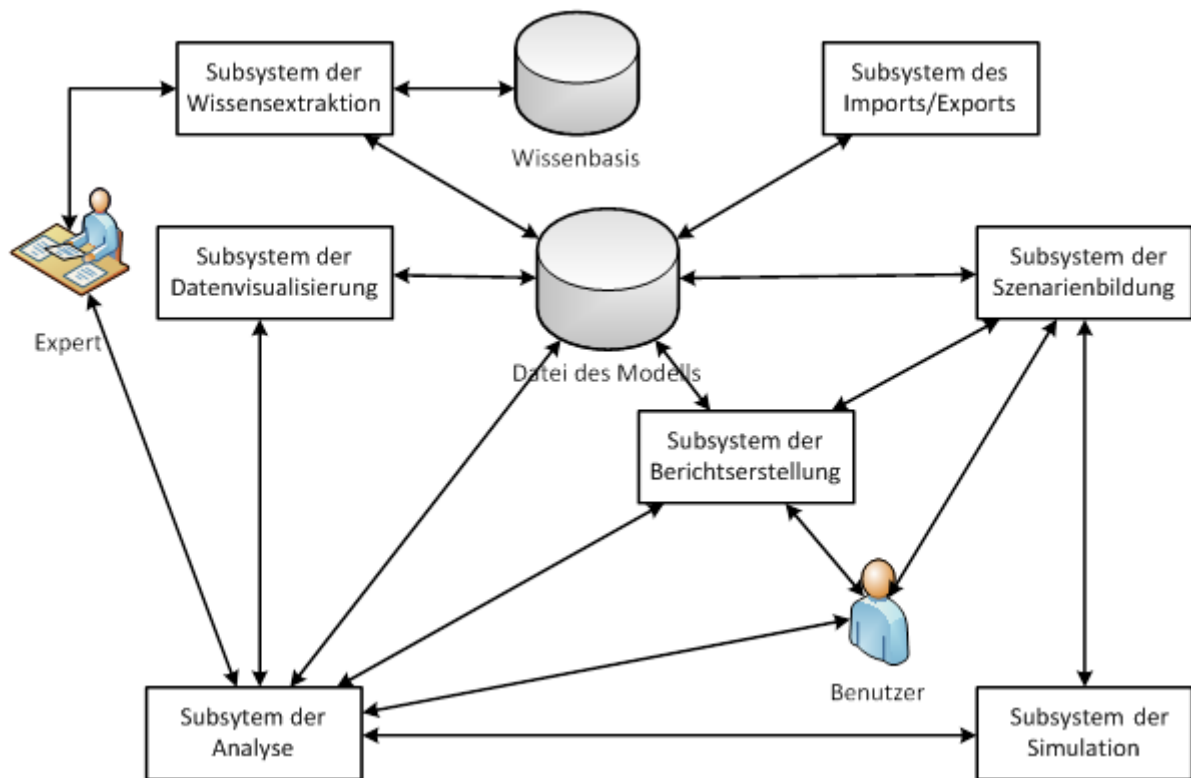


Abbildung 3-1. Architektur des analytischen Systems „Strateg“

Das System besteht aus folgenden Subsystemen, die nachfolgend beschrieben werden (siehe Punkt 3.5. Beschreibung der Subsysteme):

1. Subsystem der Wissensextraktion;
2. Subsystem der Datenvisualisierung;
3. Subsystem der Analyse;
4. Subsystem der Simulation;
5. Subsystem der Szenarienbildung;
6. Subsystem der Berichtserstellung;
7. Subsystem des Imports/Exports.

### **3.3. Struktur der Modelldatei**

Zur Speicherung der Informationen des Modells wurde die Entscheidung getroffen, einen typisierten DataSet zu benutzen. Ein typisiertes DataSet ist ein bequemes Werkzeug zur Speicherung nicht zu großer zusammengehöriger Daten in tabellarischer Struktur.

Die Benutzung des typisierten DataSets hat folgende Grundvorteile: die Einfachheit der Benutzung, Schnelligkeit des Datenzugriffs, Flexibilität der Benutzung, Vorhandensein von eingebauten Werkzeugen für die Serialisierung und Deserialisierung in/von XML Format. Serialisierung ist ein Prozess der Transformation des Objekts im Byte-fluss mit der Absicht seiner Speicherung in Speichern, Datenbanken oder in Dateien. Der Zweck der Serialisierung ist die Speicherung des Zustands des Objektes, um es nach Notwendigkeit wieder herzustellen. Man verwendet die Serialisierung zum Speichern des typisierten Datasets in der Modelldatei. Die Wiederherstellung heißt Deserialisierung.

Die Struktur des typisierten Datasets ist auf Abbildung 3-2 dargestellt.

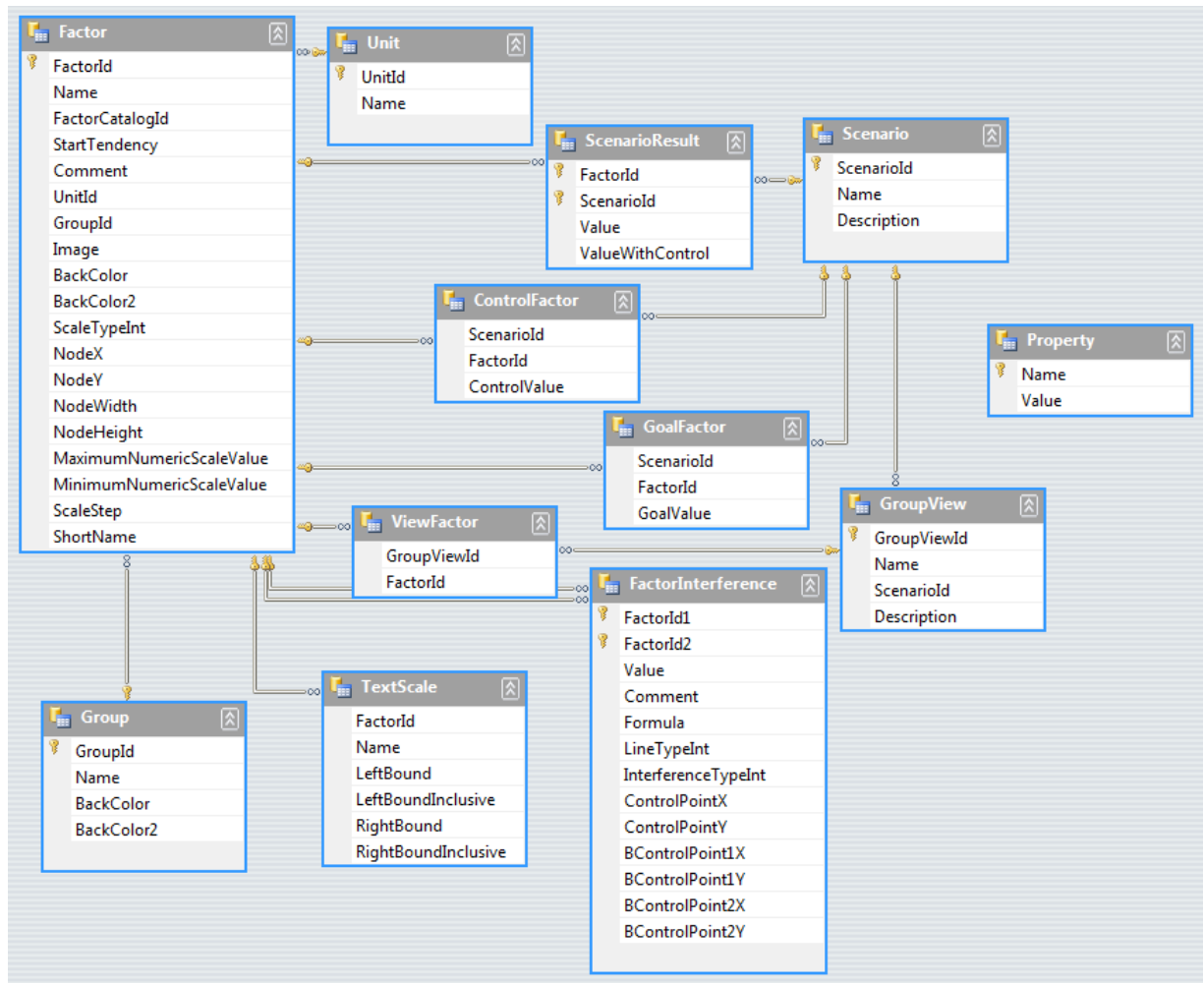


Abbildung 3-2. Struktur des typisierten Datasets

Das Data Set besteht aus folgenden Tabellen:

1. Tabelle Factor – besteht aus Information über Faktoren: Name, Maßeinheit, Typ und Eigenschaften der Skala, Gruppenzugehörigkeit, Eigenschaften der visuelle Darstellung auf dem Graph: geometrische Figur, Breite, Höhe, Farbe, Bildsymbol.
2. Tabelle FactorInterference – besteht aus Information über Faktorenauswirkungen: Wert und Typ der Auswirkung, Gleichung zur Berechnung der Auswirkung, Eigenschaften der visuellen Darstellung auf dem Graph: Linientyp (Bézierkurve oder Gerade), Kontrollpunkte der Bézierkurve.
3. Tabelle Unit – Katalog der Maßeinheiten.
4. Tabelle TextScale – besteht aus Einstellungen der Verbalskala für jeden Faktor. Tabelle Group – Katalog der Faktorengruppen.

5. Tabelle Scenario – besteht aus Information über die Szenarien des Modells.
6. Tabelle ScenarioResult – enthält die Simulationsergebnisse für jeden Faktor und jedes Szenarium.
7. Tabelle ControlFactor – enthält die Liste der Steuerfaktoren und ihre Steuerwerte für jedes Szenarium.
8. Tabelle GoalFactor – enthält die Liste der Zielfaktoren und ihre Zielwerte für jedes Szenarium.
9. Tabelle GroupView – enthält die Liste der Aufsichtsgruppen für jedes Szenarium.
10. Tabelle ViewFactor – enthält die Liste der Aufsichtsfaktoren für jede Aufsichtsgruppe.
11. Tabelle Property – enthält einige Benutzereinstellungen des Modells: Name, Beschreibung, Autor.

### **3.4. Struktur der Wissensbasis**

Im System wurde zur Sammlung, Speicherung und Wiederverwendung des Wissens des Problemgebiets eine Wissensbasis verwendet. Die Wissensbasis ermöglicht es, die im Modell gespeicherte Information flexible und zweckentsprechend zu benutzen.

Zu den Elementen der Wissensbasis gehören:

1. Faktoren;
2. Faktorengruppen;
3. Die Gesamtheit der Faktoren und Verbindungen zwischen ihnen;
4. Modelle, die das Fachgebiet beschreiben.

Die Wissensbasis ist rechentechnisch als Datenbank realisiert. Die Struktur der Datenbank basiert auf der oben beschriebenen Struktur des typisierten Datasets.

## **3.5. Beschreibung der Subsysteme**

### **Subsystem der Wissensextraktion**

Dieses Subsystem realisiert Methoden der Extraktion von Expertenwissen über Problemsituationen sowie die notwendigen Funktionen für die Bildung der kognitiven Karte. Zwei Modi des Modellschaffens sind vorgesehen: durch direkte Bearbeitung der kognitiven Karte (visuell) und durch Bearbeitung der Faktorenliste mittels paarweiser Bewertung der Faktorenauswirkungen.

### **Subsystem der Datenvisualisierung**

Das Subsystem der Datenvisualisierung ist zur Darstellung der verschiedenartigen Information des Systems in zweckmäßiger Weise geeignet (graphische Darstellung, Säulendiagramme usw.). Dieses Subsystem realisiert folgende Möglichkeiten:

1. Arbeit mit kognitiver Karte (Abbildung der Faktoren und der Wechselwirkungen zwischen ihnen, Bearbeitung ihrer visuellen Darstellung);
2. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse nach der Selbst- und gesteuerten Entwicklung;
3. Visualisierung der Paretoanalyse, Analyse der Auswirkungen, Kurve der Änderung des Faktorenwertes in der Simulation;
4. Visualisierung der Analyse der Einflussfaktoren (Einfärbung).

Zur Visualisierung der kognitiven Karte ist eine Komponente des Benutzerinterfaces entwickelt. Die Komponente erlaubt es, den Graph zu visualisieren, zu modifizieren und zu animieren. Die Architektur der Komponente ist in der Abbildung 3-3 dargestellt.

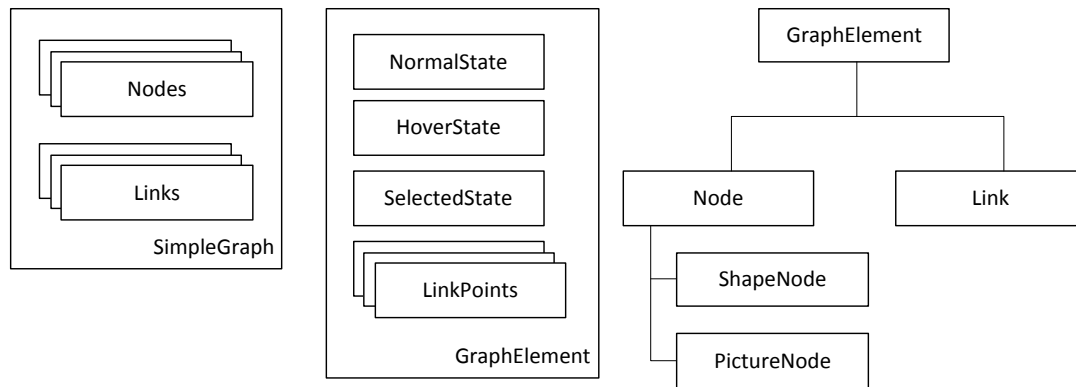


Abbildung 3-3. Architektur der Komponente zur Visualisierung der kognitiven Karte

Knoten (Nodes) und Kanten (Links) sind die Elemente des Graphs (GraphElement). Jedes Element des Graphs kann in einem von drei möglichen Zustände sein: normaler Zustand (Normal-State), ausgewählter Zustand, wenn der Benutzer das Element ausgewählt hat (SelectedState) und Hoverzustand, wenn die Maus auf dem Element ist. Je nach den Zuständen kann jedes Element des Graphs anders beschildert werden. Dies ermöglicht durch Animation die visuelle Abbildung der Benutzeraktionen anzuzeigen. Die Knoten des Graphs können als geometrische Figur (ShapeNode) oder als benutzerdefinierte Abbildung (PictureNode) geschildert werden.

### Subsystem der Analyse

Dieses Subsystem realisiert die statische und dynamische Analyse der kognitiven Karten. Zu den statischen Methoden gehört hauptsächlich die Methode der Analyse der Einflussfaktoren. Zu den dynamischen gehören die rechnerische Methoden, z.B. Ketten-Analyse, Analyse der Auswirkungen, Pareto Analyse, Kurve von Änderung des Faktorenwertes in der Simulation (siehe Punkt 2.2.11. Analysenwerkzeuge).

### Subsystem der Simulation

Dieses Subsystem realisiert alle notwendigen Berechnungen zur Durchführung der Simulation. Man unterscheidet drei Grundberechnungen:

1. Berechnung der Erreichbarkeitsmatrix des Graphs (Die Erreichbarkeitsmatrix ist eine binäre Matrix, die die Information über die gesamte gegenseitige Erreichbarkeit der Knoten spei-

chert. Die Erreichbarkeitsmatrix wird zum Abschneiden der Kettenberechnung bei der Optimierung benutzt);

2. Ermittlung und Berechnung der Auswirkungsketten;
3. Berechnung der Impulsprozesse für die Simulation der Entwicklungsszenarien.

### **Subsystem der Szenarienbildung**

Dieses Subsystem realisiert die Arbeit mit Szenarien. Mittels dieses Subsystems können die Ziel- und Steuerfaktoren sowie die Aufsichtsgruppen für jedes Szenarium bestimmt werden. Nach der Simulation werden alle Simulationsergebnisse für jeden Faktor gespeichert. Dieses Subsystem realisiert auch die Möglichkeit zum Vergleich der Szenarien und der Auswahl der optimalen Szenarien auf der Basis der verschiedenen Entscheidungsregeln (siehe Punkt 2.2.11. Analysenwerkzeuge, Effizienz der Szenarien).

### **Subsystem der Berichtserstellung**

Dieses Subsystem bildet Berichte und speichert sie in verschiedene Formate. Der Bericht kann aus folgenden Punkten bestehen:

1. Allgemeine Information zum Modell (Name, Beschreibung, Author);
2. Faktorengruppen;
3. Faktorenliste (Faktor, Maßeinheit, Anfangswert);
4. Ausführliche Information über Faktoren (Name, Kommentar, Type der Skala, Grenzwerte der Skala, Maßeinheit, Anfangswert);
5. Information über Verbindungen nach Typ (Im Fall der verbale Verbindungen: verbale Beschreibung, Kommentar, im Fall der funktionelle Verbindungen: Funktion, Kommentar);
6. Kognitive Karte;
7. Information über Szenarien (Szenarienbeschreibung, Zielfaktoren, Steuerfaktoren, Aufsichtsgruppen);



8. Simulationsergebnisse für jedes ausgewählte Szenarium an Aufsichtsgruppen oder an Gruppen des Modells.

Den Algorithmus der Berichtserstellung kann man als Schema in der Abbildung 3-4 erkennen.

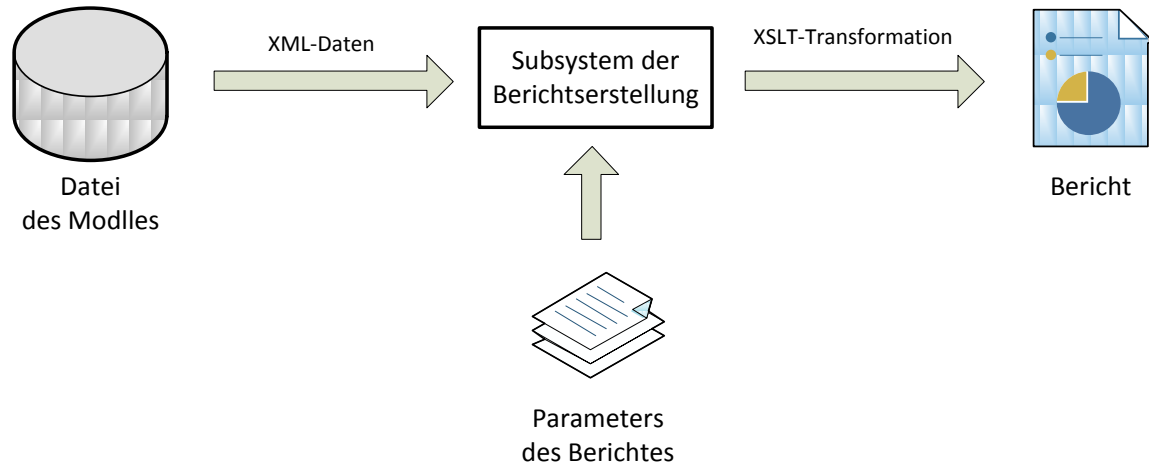


Abbildung 3-4. Algorithmus der Berichtserstellung

Im ersten Schritt generiert das Subsystem der Berichtserstellung eine XML-Darstellung des Modells. XML (eXtensible Markup Language) — ist einen Textformat, das zur hierarchische Darstellung strukturierter Daten und zum Informationsaustausch zwischen den Programmen angewendet wird.

Im zweiten Schritt wird auf der Basis der ausgewählten Parameter des Berichtes die Ausgabedatei des Berichtes mittels XSLT-Transformation generiert. XSLT (eXtensible Stylesheet Language Transformations) ist eine Programmiersprache zur Transformation von XML-Dokumenten. Durch die Anwendung der XSLT zu XML-Dokument wird ein logischer Baum errichtet, der jede Dateiformate serialisieren kann.

Somit ist es dank flexibler Architektur und der Anwendung der universellen Sprache möglich, die Ausgangsdaten in jedem Dateiformat zu speichern und flexibel die Aufmachung und Bestandteile des Berichtes einzustellen.

## Subsystem des Imports/Exports

Dieses Subsystem realisiert die Möglichkeit für den Export (sowie Import) der Auswirkungsmatrix zu CSV-Textdateiformat. Dieses Dateiformat dient zum Austausch strukturierter Daten zwischen den Computerprogrammen.

### 3.6. Entwicklung des Systeminterface

Das Systeminterface ist mit Hilfe der so genannten Multiple Document Interface realisiert. Jedes Modell befindet sich in einem separaten Programmfenster. Die Beschreibung des Modells ist auf den Registerkarten (Tabs) verteilt. Die Registerkarten sind mittels des so genannten Tabbed Document Interface organisiert. Das Modell hat folgende Registerkarten:

#### 1. Modell

In der Registerkarte Modell kann man die allgemeine Information über das Modell (Modellname, Modellautor, Beschreibung) eingeben oder ändern.

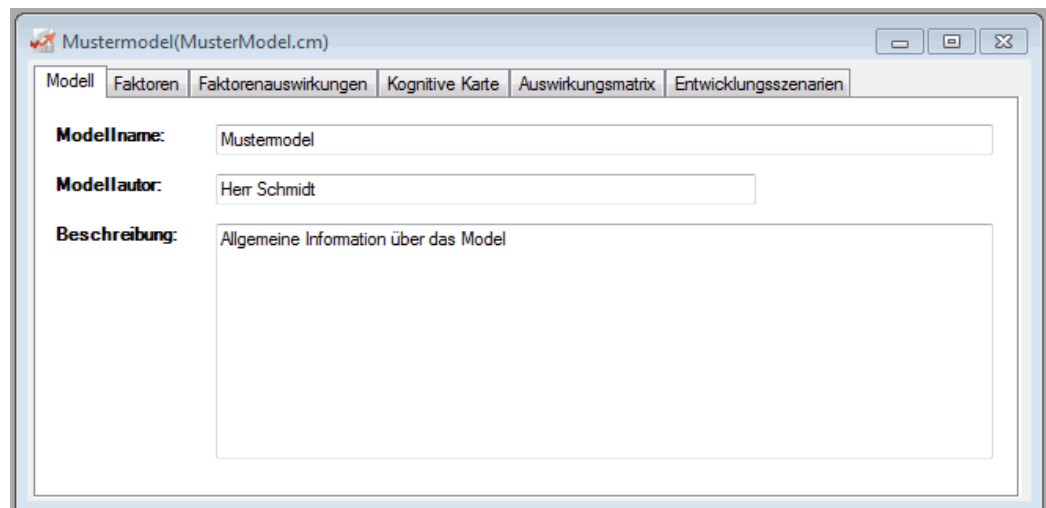


Abbildung 3-5. Registerkarte Modell

## 2. Faktoren

In die Registerkarte Faktoren kann man die Faktorenliste des Modells ansehen und umgestalten (Faktoren löschen, neue Faktoren einfügen, Faktoren bearbeiten).

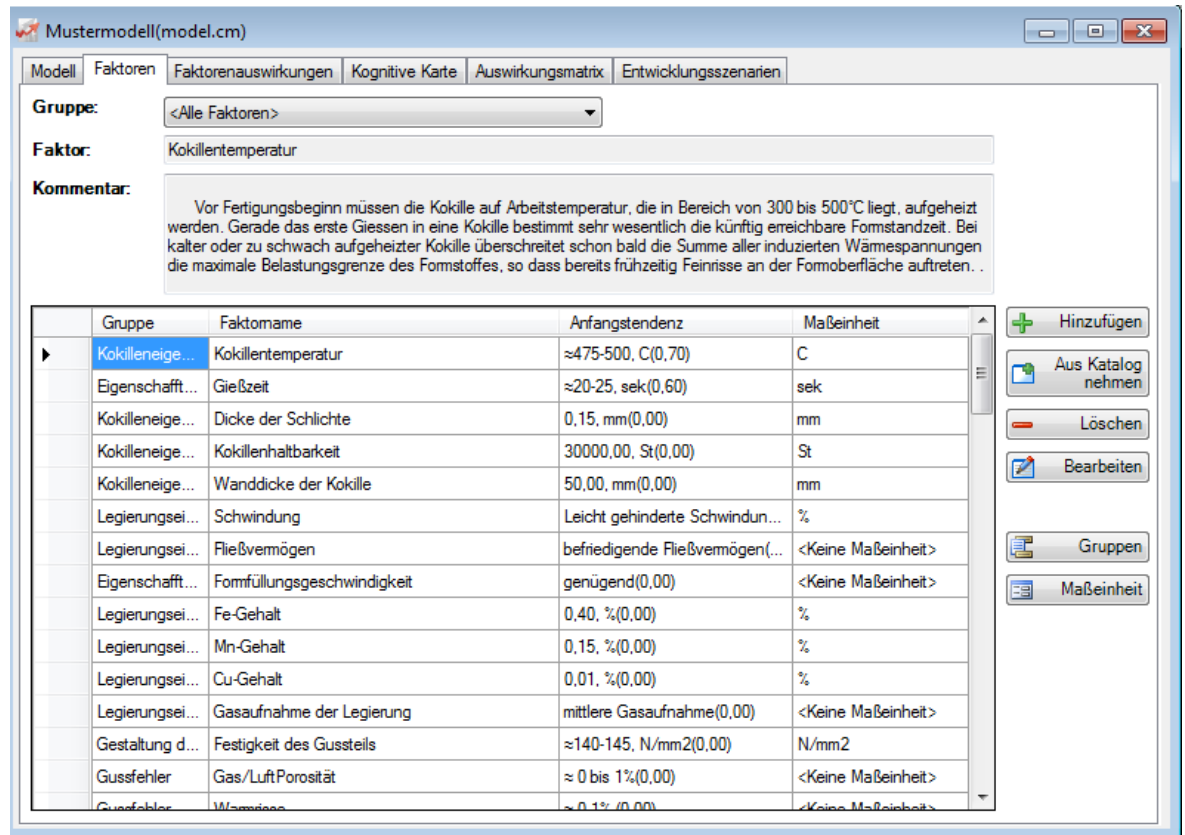


Abbildung 3-6. Registerkarte Faktoren

## 3. Faktorenauswirkungen

Im Unterfenster Faktorenauswirkungen man kann mittels paarweisem Vergleich die Auswirkungen zwischen den Faktoren eingeben, löschen und bearbeiten

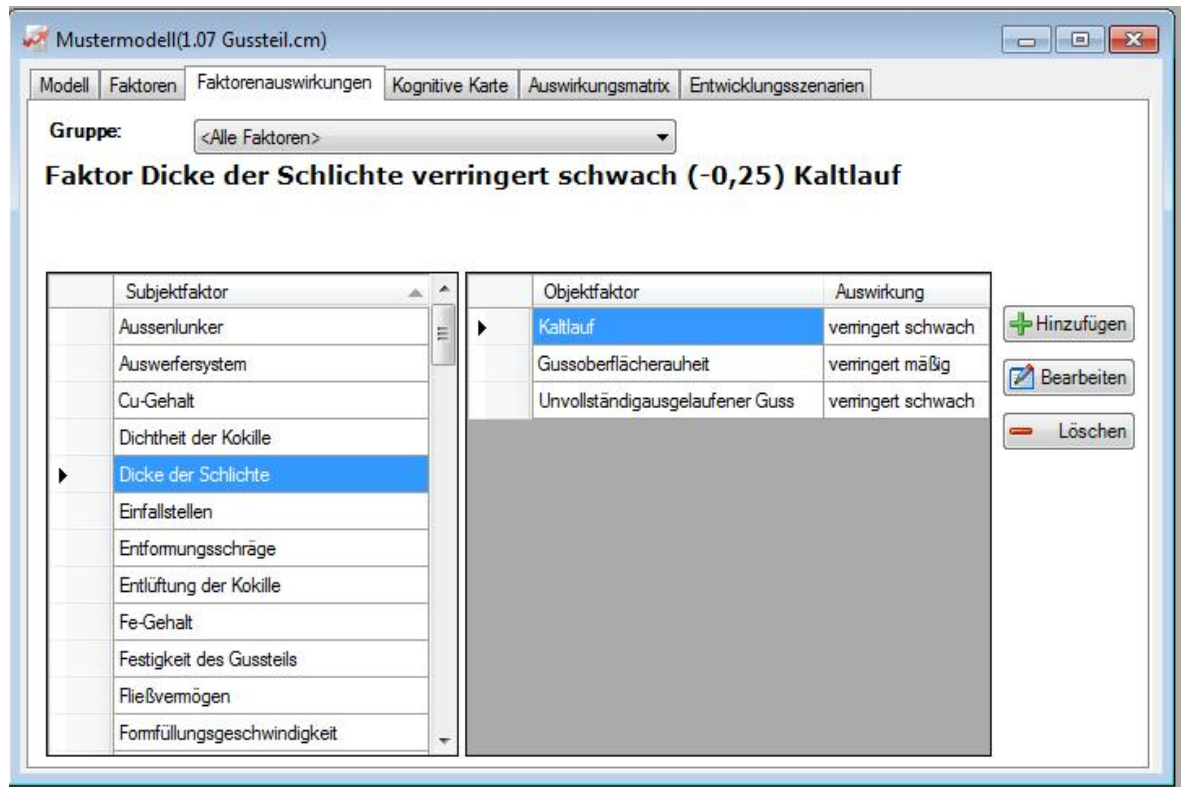


Abbildung 3-7. Unterfenster Faktorenauswirkungen

#### 4. Kognitive Karte

Auf der Abbildung 3-8 sieht man das Unterfenster kognitive Karte. Mittels dieses Unterfensters kann man die kognitive Karte durch Bearbeitung der Faktoren und Verbindungen ändern. In diesem Unterfenster sind die meisten Analysemöglichkeiten zugänglich.

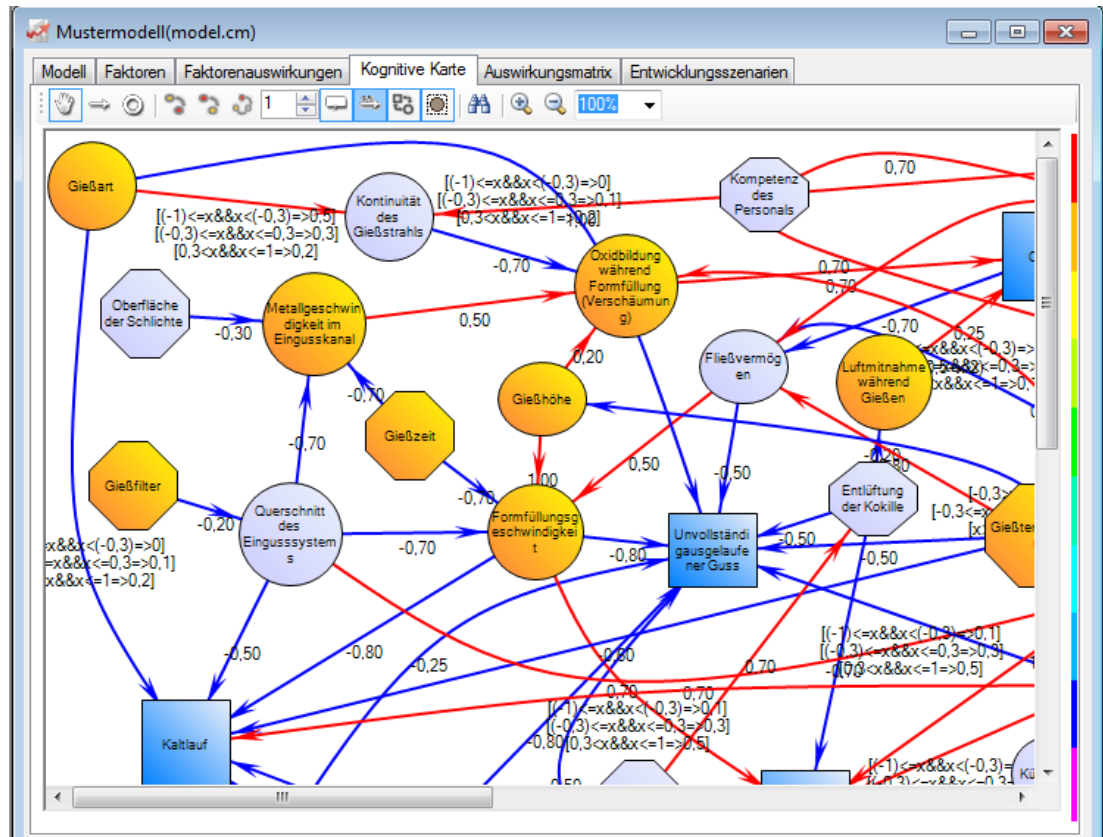


Abbildung 3-8. Unterfenster kognitive Karte

## 5. Auswirkungsmatrix

Mittels dieses Unterfensters kann man alle Verbindungen zwischen Faktoren in Matrizenform ansehen.

Fragment eines Modells(model\_small.cm)

ModellFaktorenFaktorenauswirkungenKognitive KarteAuswirkungsmatrixEntwicklungsszenarien

	Numm	Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
▶	1	Fließvermögen		0,5										
	2	Formfüllungsgeschwindigkeit			0,7	-0,8								
	3	Gas/Luft Porosität												
	4	Kaltlauf												
	5	Wanddicke des Gussteils (...)				-0,6	-0,6							
	6	Gießtemperatur	0,8...			-0,6			0,7					
	7	Oxide	-0,7											
	8	Oxidbildung während Formf...							0,7					
	9	Gießhöhe		1							0,2			
	10	Kontinuität des Gießstrahls									-0,7			
	11	Querschnitt des Eingussyst...		-0,7		-0,5								
	12	Kompetenz des Personals										1		

Abbildung 3-9. Unterfenster Auswirkungsmatrix

## 6. Entwicklungsszenarien

In der Abbildung 3-10 ist das Unterfenster Entwicklungsszenarien dargestellt. Hier kann man die Szenarien bearbeiten (neue einfügen, vorhandene ändern oder löschen). Das Unterfenster besteht aus drei tieferen Registerkarten: Strategie, Aufsichtsfaktoren und Ergebnisse.

### Strategie

Registerkarte Strategie ist bei Default gezeigt. Auf das Unterfenster Strategie man kann die Simulationseinstellungen eingeben, dass heißt Ziel- und Steuerfaktoren auswählen und ihre Werte angeben.

The screenshot shows the 'Entwicklungsszenarien' window with the following data:

**Szenarien:** Kombi 2  
**Beschreibung:** Schmelzbehandlung, Veredelung, Gießzeit

**Gruppe:** Gussfehler

Faktor	Zielwert
Gas/Luft Porosität	≈ 0 bis 1% (0,00)
Wamrisse	≈ 0-1% (0,00)
Kaltlauf	≈ 0-1% (0,00)
Oxide	vorhandene Oxide, kein Ausschuss (-0,20)
Kaltrisse	≈ 0-1% (0,00)
Verzug	≈ 0-1% (0,00)

Faktor	Steuerimpuls	Steuerwert
Gießzeit	-0,15	≈15-20, sek(0,45)
komplexe Schmelzbehandlung	0,3	technologie eingehalten(0,70)
Veredelung	0,3	gelungene Veredelung(0,70)
Querschnitt des Eingussystems	0,1	4,25, cm2(0,50)

Abbildung 3-10. Unterfenster Szenarien – Strategie

### Aufsichtsfaktoren

Die Registerkarte Aufsichtsfaktoren des Unterfensters Szenarien ist in der Abbildung 3-11 gezeigt. Mittels Unterfenster Aufsichtsfaktoren kann man die Faktoren auswählen, deren Dynamik man nach der Simulation beobachten will.

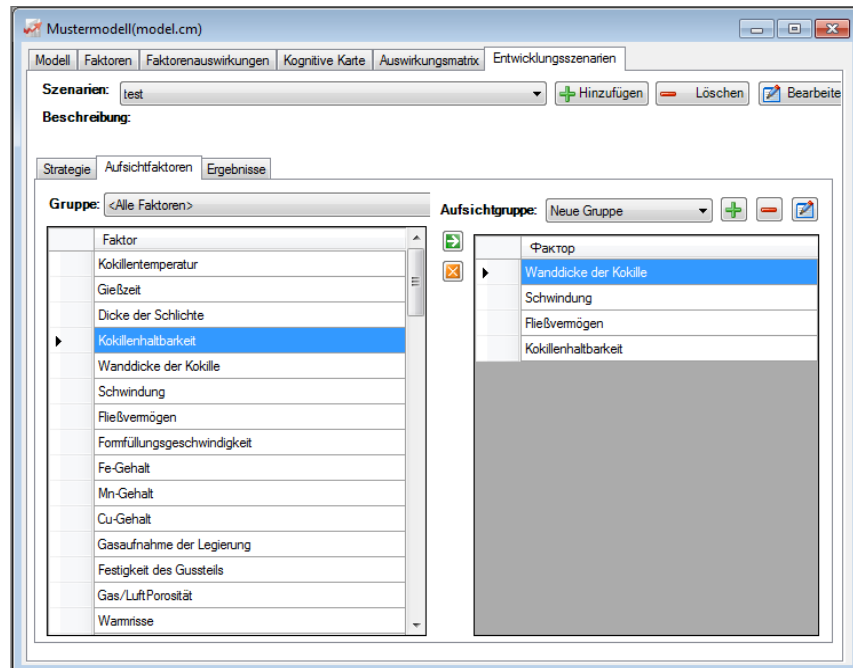


Abbildung 3-11. Unterfenster Szenarien - Aufsichtsfaktoren

## Ergebnisse

Die Registerkarte Ergebnisse des Unterfensters Szenarien ist in der Abbildung 3-12 gezeigt. Im Unterfenster Ergebnisse kann man die Ergebnisse der Simulation in tabellarischer oder graphischer Form einsehen.

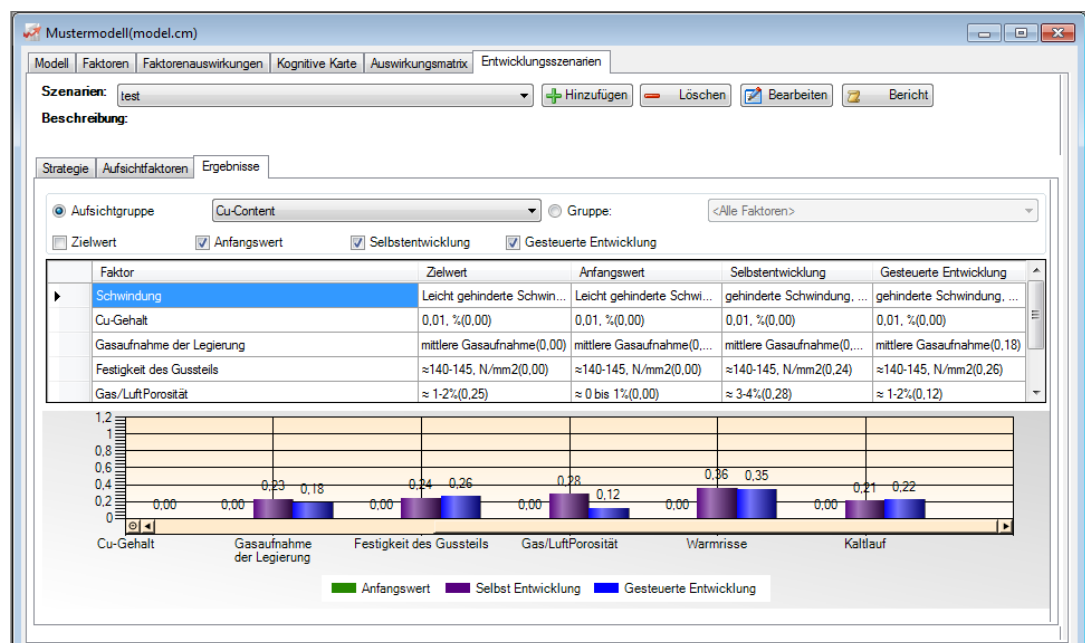


Abbildung 3-12. Unterfenster Szenarien – Ergebnisse

Von den oben beschriebenen Registerkarten kann man verschiedene Dialoge öffnen, um die Modellparameter zu bearbeiten.

In der Abbildung 3-13 ist der Dialog „Bearbeitung des Faktors“ dargestellt. Mittels dieses Dialogs kann man die Eigenschaften des Faktors (Gruppe, Name, Kommentar, Anfangstendenz, Skala) eingeben oder ändern. Auch die visuelle Darstellung des Faktors kann hier geändert werden (Abbildung, Farbe, Breite, Höhe).

**Faktorbearbeitung 'Gießzeit'**

**Faktor** | Skala

**Gruppe:** Eigenschaften des Prozessablaufs

**Faktorname:** Gießzeit **Auswirkungen**

**Kurzname:**

**Kommentar:**  
Die Abkühlungsdauer von der jeweiligen Gießtemperatur bis zur Liquidustemperatur der betreffenden Legierung ist die Zeit, die praktisch als Gießzeit zur Verfügung steht.  
Für die Berechnung von Gießzeit  $z$  ist die kleinste Wanddicke  $w$  (in mm) der Guss-Stücke ist von Bedeutung.  
Für Kokillenguss gilt allgemein:  
 $Z = w$  in s (Kopfguss bis 4 kg Masse)  
 $Z = w + 1$  in s (Kopfguss bis 10 kg Masse)  
 $Z = w + (2 \text{ bis } 18)$  bei Gussteilen mit sehr hoher Kokillentemperatur [alles nach 1].  
Bei Verlängerung der Gießzeit muss man auch die Querschnitt des Eingussystems entsprechend ändern (verkleinern).  
[1] Fachkunde Gießereitechnik, von einem Autorenkollektiv. Deutsche Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1989 ISBN: 3-342-00364-2.  
Bei ausgewählten Guss-Stück liegt die Gießzeit bei 20 sec.

**Abbildung:** **Aufladen** **Farbe1** **Breite:** 60 **Proportionen speichern**  
**Löschen** **Farbe2** **Höhe:** 60

**Anfangstendenz:**  $\approx 20-25, \text{ sek}(0,60)$  **Berechnen**

**OK** **Abbrechen**

Abbildung 3-13. Dialog „Bearbeitung des Faktors“

Mittels des Dialogs „Bearbeitung der Auswirkungen“ kann man die Type der Verbindung bestimmen, Kommentar eingeben und auch die visuelle Darstellung auf dem Graph einstellen (Abbildung 3-14).

In der Abbildung 3-15 ist der Dialog der Auswirkungs- und Paretoanalyse dargestellt. Hier kann man die Faktoren nach Auswirkungskraft sortieren und die Gruppe der Faktoren wählen, die den stärksten Einfluss auf den gewählten Faktor ausüben.



**Bearbeitung der Auswirkung**

**Subjektfaktor:** Fließvermögen

**Objektfaktor:** Formfüllungsgeschwindigkeit

**Auswirkungsgrad:** ☒ Verbalskala ☐ Funktion  
erhöht mäßig (0,5)

**Verbal Interpretation der Auswirkungen:**  
Faktor Fließvermögen erhöht mäßig (0,5) Formfüllungsgeschwindigkeit

**Kommentar:**  
Bei guten Fließvermögen wird Form schneller gefüllt.

**Auf dem Graf wird abgebildet als:** ☒ gerade Linie ☐ Kurve ☐ Bezierkurve

Abbildung 3-14. Dialog „Bearbeitung der Auswirkung“

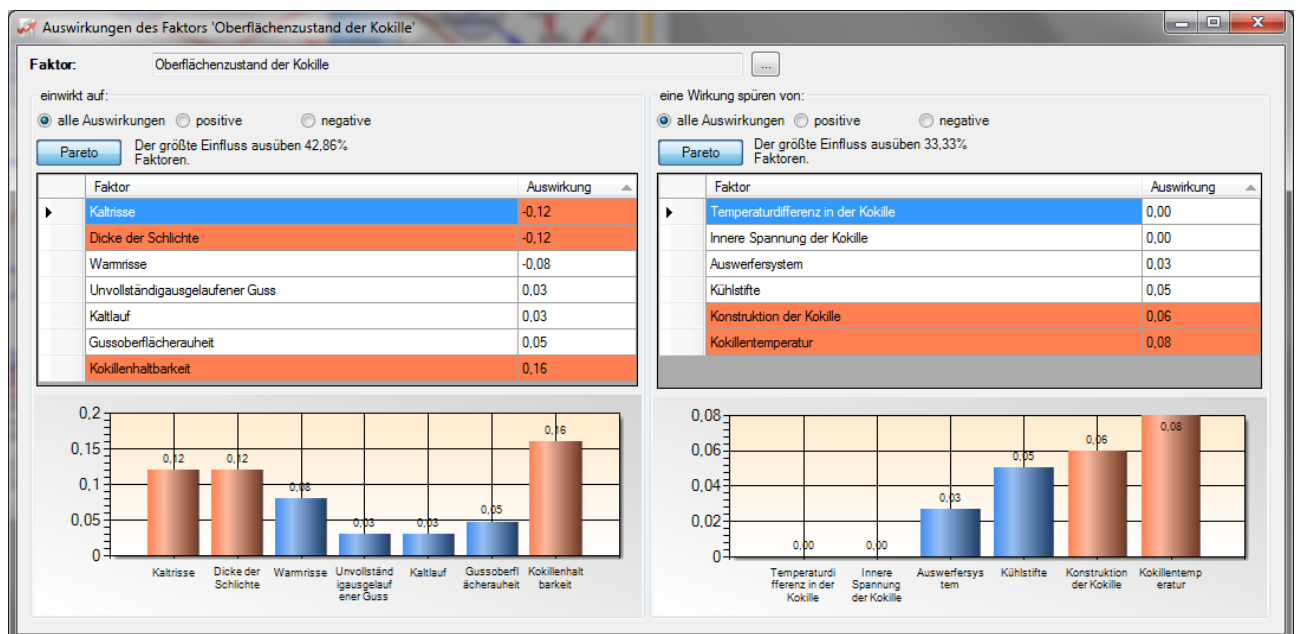


Abbildung 3-15. Analyse der Auswirkungen, Pareto-Analyse

In der Abbildung 3-16 ist der Dialog dargestellt, in dem man die Kurve der Änderung des Faktorenwertes in der Simulation anschauen kann. Mittels dieses Dialogs kann man die Faktorenverhältnisse in der Simulation der ausgewählten Szenarien analysieren.

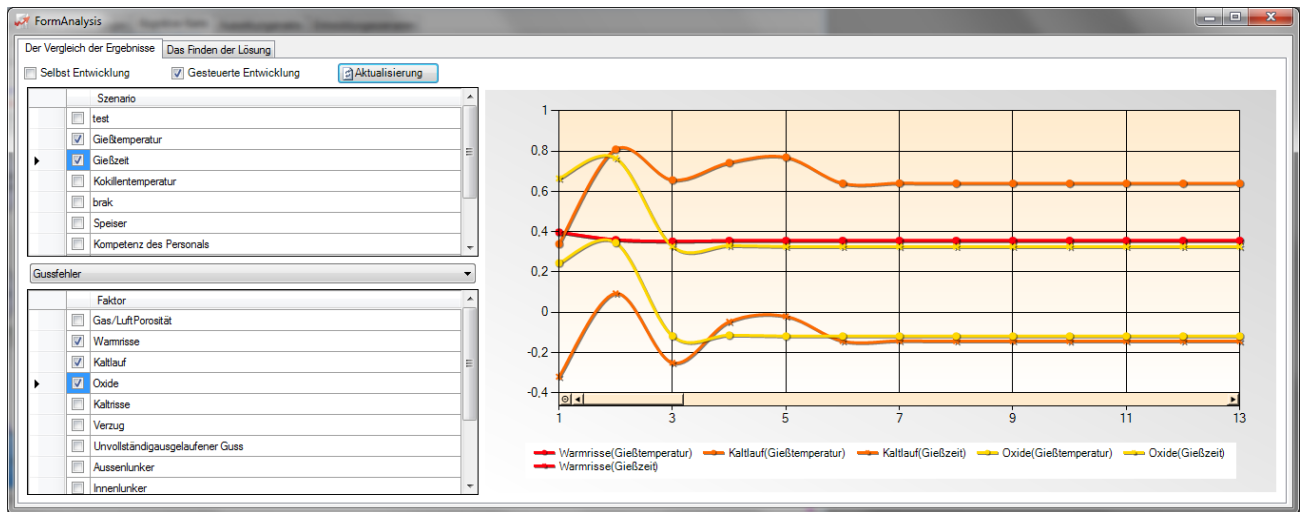


Abbildung 3-16. Kurve der Änderung des Faktorenwertes in der Simulation

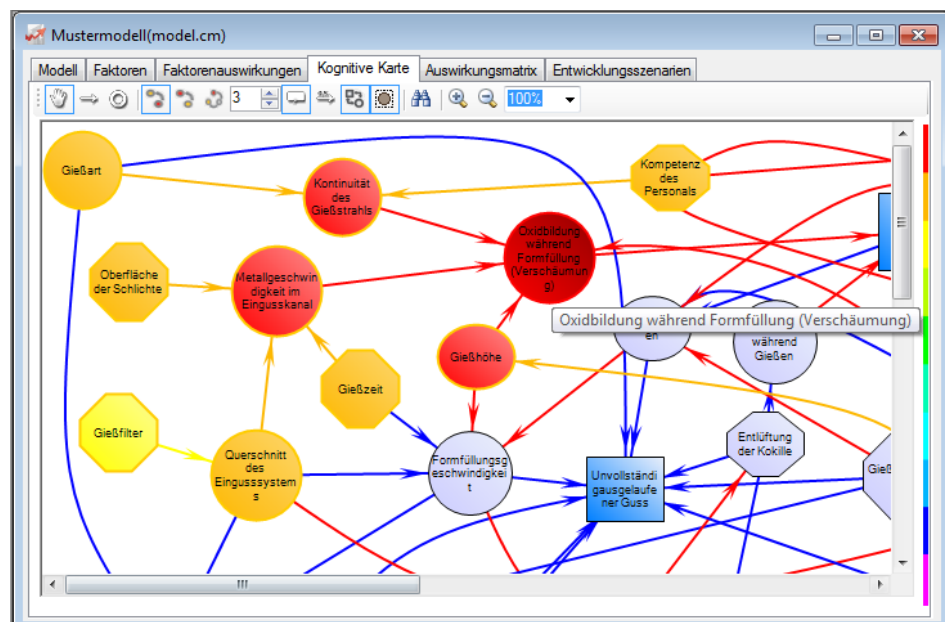


Abbildung 3-17. Visuelle Erkennung der Einflussfaktoren

In der Abbildung 3-17 ist die visuelle Erkennung der Einflussfaktoren abgebildet. Das Einflussniveau verschiedener Faktoren auf ausgewählte Faktor ist durch die Einfärbung zu erkennen. Man kann die Kettenlänge für die Einfärbung angeben.

### 3.7. Arbeitsvarianten mit dem System

Die mögliche Arbeitsvarianten mit dem System können als UML-Diagramm dargestellt werden (Abbildung 3-18). Es gibt zwei Personen, die mit dem System zusammenwirken können: Expert und Benutzer. In der Methodik (siehe Punkt 2.2. Entwicklungsmethodik, Simulation und Analyse eines kognitiven Modells zur Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehlern) wurde vorgeschlagen, dass das Modell von Expert/Analytikern geschaffen und geprüft und von Benutzer analysiert und simuliert werden soll. Der Benutzer darf das Modell ändern, untersuchen sowie Analyse und Simulationen durchführen.

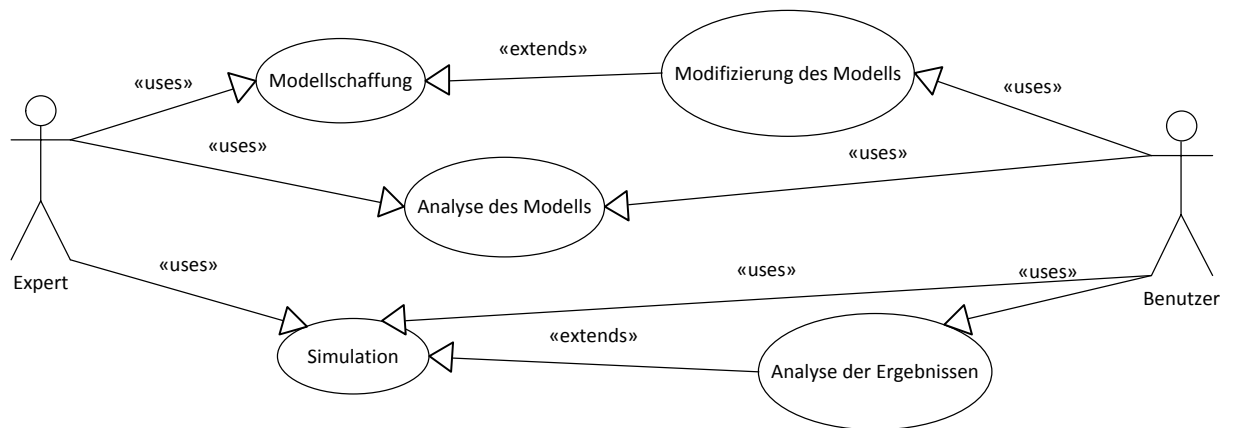


Abbildung 3-18. UML-Diagramm der Arbeitsvarianten

## **Teil 4. Simulation mit Hilfe des kognitiven Modells zur die Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehlern**

In (63) wurde durch Kudaschov, N. ein kognitives Modell zur Ursachenerforschung und Vermeidung von Gussfehler entwickelt und beschrieben. Das Modell basiert auf der im Teil 2 beschriebenen Methodik und wurde mittels der analytischen Software „Strategist“ erstellt.

Das kognitive Modell wurde für ein mit Hilfe des Kokillengussverfahrens (Schwerkraftguss) gegossenes Gussstück aus einer Al-Legierung geschaffen, und es besteht aus insgesamt 78 Faktoren. Die Faktoren beschreiben die beim Gießen, Schmelzen, der Gussstückentfernung usw. stattfindenden Prozesse. Manche Faktorenbeschreibungen und Verbindungen zwischen Faktoren, die im Programm hinterlegt sind, stammen aus der Literatur. Die anderen wurden aus Gesprächen mit Experten sichergestellt. Die Gewichtung von Verbindungen sind mit Fachleuten intensiv ausdiskutiert worden.

### **4.1. Beschreibung des Gussstückes**

Das Gussstück stellt ein Maschinengehäuse dar, das aus der Legierung AlMg3(a)KF hergestellt wird. Das Nettogewicht liegt bei 10,5 kg. Die Wanddicke liegt zwischen 6,0 und 10,0 mm. Das Gussstück wird in einer Kokille gegossen. Die Wanddicke der Kokille beträgt ca. 50 mm.

Die Legierung AlMg3 hat folgende Gießeigenschaften: mittleres Fließvermögen, eher schlechtes Speisungsvermögen, hohe Neigung zur Gasaufnahme, starke Rissbildung. Die Gießtemperatur liegt bei 820°C, die Gießzeit beträgt ca. 20 sec. Die Kokille wird auf 465°C an einer Seite und auf 500°C an der anderen Seite vorgewärmt. Für die Kühlung werden an Wärmeknoten Kühlstifte aus Kupfer eingesetzt. Um eine einwandfreie Formfüllung zu gewährleisten, wird das Gussstück unter einem Winkel von 30° gegossen. Die größte Schwierigkeit liegt darin, dass das Gussstück flach ist: die Länge beträgt 590,1 mm bei einer durchschnittlichen Dicke von 6,0 mm.

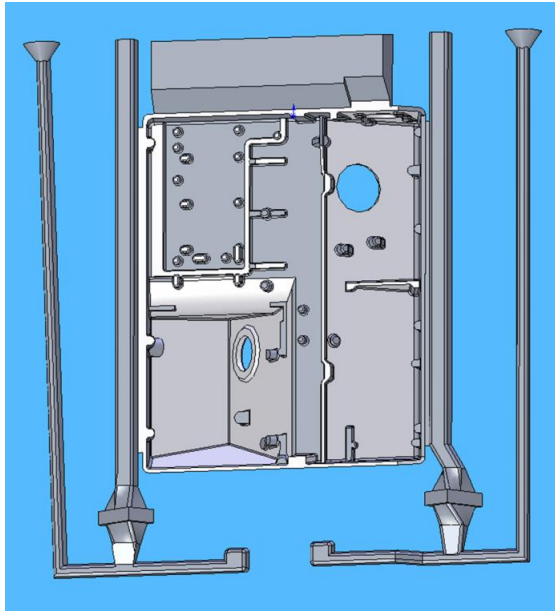


Abbildung 4-1. Gussteil mit Gießsystem (64 S. 55)

## 4.2. Anfangsbedingungen

Bei der kognitiven Modellierung erfolgt die Beschreibung der Eingangssituation mittels Anfangswerte der Faktoren. Unten werden die im Modell angegebenen Anfangsbedingungen gruppenweise aufgelistet. In jeder Gruppe gibt es zwei Typen von Faktoren: die Faktoren, die die Eingangssituation durch Anfangswerte bestimmen, und die Faktoren ohne Anfangswerte. Im Laufe der Simulation werden alle Faktorenwerte auf der Basis der angegebenen Daten (Modellstruktur, Verbindungen und Anfangsbedingungen) umgerechnet. Im Modell (63) sind folgende Gruppen vorgesehen: Legierungseigenschaften, Personal und Anlagen, Kokilleneigenschaften, Eigenschaften des Prozessablaufs, Eigenschaften des Gussstücks, Gussfehler.

### Legierungseigenschaften

Die Gruppe Legierungseigenschaften besteht aus 14 Faktoren, davon kann man für 9 Faktoren die Anfangsbedingungen angeben (Tabelle 4-1).

Nr.	Faktor	Mögliche Werte	Anfangswert (Innenwert der Software)
1	Fe-Gehalt	0,3 – 0,5%	0,4% (0,00)
2	Mn-Gehalt	0,001 – 0,3%	0,15% (0,00)
3	Cu-Gehalt	0,00-0,02%	0,01% (0,00)
4	Mg-Gehalt	2,7-3,5%	3,15% (0,12)
5	Si-Gehalt	0,4-0,55%	0,48% (1,00)
6	Zn- Gehalt	0,00-0,02%	0,01% (0,00)
7	Typ der Erstarrung	exogen glattwandig, exogen rauwandig, exogen schwammartig, endogen breiartig endogen schalenbildend	exogen schwammartig (0,00)
8	Veredelung	keine gelungene, zum Teil gelungene, gelungene	gelungene (0,40)
9	Qualität des Rohstoffes	schlechte, befriedigte, ausgezeichnete	befriedigte (0,0)

Tabelle 4-1. Anfangswerte der Legierungseigenschaften

Für die folgenden fünf Faktoren werden keine Anfangswerte notwendig:

- 1) Gasaufnahme der Legierung
- 2) Volumendefizit während der Erstarrung
- 3) Speisungsvermögen
- 4) Fließvermögen
- 5) Schwindung

## Personal und Anlagen

Diese Gruppe besteht aus 7 Faktoren. Für 5 Faktoren können die Anfangsbedingungen angegeben werden (Tabelle 4-2).

Nr.	Faktor	Mögliche Werte	Anfangswert (Innenwert der Software)
1	Kompetenz des Personals	Niedrige, mittlere, hohe, sehr hohe	hohe(0,20)
2	Stabilität der Gießmaschine	Niedrige, mittlere, hohe Stabilität	hohe Stabilität(0,40)
3	Metall-Transport	über Rinne, über Pfanne	über Pfanne(0,10)
4	Schmelzprozess	Induktivbeheizter, Gasbeheizter Ofen	Gasbeheizter(1,00)
5	Gießlage	Vertikal, unter Winkel, horizontal	unter Winkel (37°)(-0,10)

Tabelle 4-2. Anfangswerte der Gruppe Personal und Anlage

Für die folgenden Faktoren werden keine Anfangswerte notwendig:

1. Kontinuität des Gießstrahls
2. Sauberkeit der Gießkelle

### Kokilleneigenschaften

Die Gruppe Kokilleneigenschaften ist mittels 21 Faktoren dargestellt. Für 17 Faktoren sollen die Anfangsbedingungen angegeben werden (Tabelle 4-3).

Nr.	Faktor	Mögliche Werte	Anfangswert
1	Konstruktion der Kokille	Ungünstige, befriedigte, günstige Konstruktion	günstige Konstruktion(0,40)
2	Querschnitt des Eingusssystem	2-5cm <sup>2</sup>	4,10cm <sup>2</sup> (0,40)
3	Material der Kokille	Gusseisen, Stahl	Stahl (1,00)
4	Massgenauigkeit der Kokille	Niedrige, mittlere, hohe Massgenauigkeit	hohe Massgenauigkeit (0,40)
5	Entformungsschräge	Kein, geringerer, mittlerer, starker Verzug	geringerer Verzug (-0,90)
6	Auswerfsystem	nicht fachgerechte Konstruktion, fachgerechte Konstruktion	fachgerechte Konstruktion (0,30)
7	Wanddicke der Kokille	20-50mm	50,00mm (1,00)
8	Entlüftung der Kokille	Schlechte, befriedigte, gute	gute (0,50)
9	Qualität der Schlichte	Schlechte, befriedigende, gute	gute (0,40)
10	Oberflächenzustand der Kokille	Schlechter, befriedigender, guter	guter (0,40)
11	Kokillentemperatur	≈350 oder weniger, ≈350-375, ≈375-400, ≈400-425, ≈425-450, ≈450-475, ≈475-500, ≈500 C oder mehr	≈475-500 C (0,7)
12	Kühlstifte	Gute, befriedigte, schlechte Wärmeleitung	gute Wärmeleitung(0,6)
13	Dicke der Schlichte	0,1-0,2mm	0,15mm (0,00)
14	Oberfläche der Schlichte	Niedrige, mittlere, hohe Rauigkeit	hohe Rauigkeit(0,40)
15	Verschleiß der Kokille	Kein, geringerer, mittlerer, größerer	geringere (-0,9)
16	Dichtheit der Kokille	Ungenügende, mittlere, gute	gut (0,40)
17	Verschleiß der Zentrier- und Zulegestifte	Kein, geringerer, mittlerer, größerer	geringerer (-0,90)

Tabelle 4-3. Anfangswerte der Gruppe Kokilleneigenschaften

Für die folgenden Faktoren werden keine Anfangswerte notwendig:

1. Innere Spannung der Kokille
2. Temperaturdifferenz in der Kokille
3. Wärmeverzug der Kokille
4. Kokillenhaltbarkeit

### Eigenschaften des Prozessablaufs

Die Gruppe Eigenschaften des Prozessablaufs ist mittels 19 Faktoren dargestellt. Für 11 Faktoren sollen die Anfangsbedingungen angegeben werden (Tabelle 4-4).

Nr.	Faktor	Mögliche Werte	Anfangswert
1	Gießart	Kippguss, Niederdruckguss, Schwerkraftguss	Schwerkraftguss (1,00)
2	Gießhöhe	≈350, ≈700, ≈500 mm	≈500 mm (0,20)
3	Speiser	keine gelungene Form/Größe, befriedigte Form/Größe, gute Form/Größe	gute Form/Größe (0,40)
4	Gießfilter	kleiner Durchströmquerschnitt, optimaler Durchströmquerschnitt	optimaler Durchströmquerschnitt (0,40)
5	Gießzeit	≈ bis 5, ≈5-10, ≈10-15, ≈15-20, ≈20-25, ≈25 Sek. oder mehr	≈20-25Sek. (0,60)
6	Gießtemperatur	≈680 oder weniger, ≈680-700, ≈700-720, ≈720-740, ≈740-760, ≈760-780, ≈780-800, ≈800-820, ≈820 C oder mehr	≈800-820 C (0,95)
7	Komplexe Schmelzebehandlung	Technologie nicht eingehalten, Technologie z.T. eingehalten, Technologie eingehalten	Technologie eingehalten (0,40)
8	Schmelzzeit	Ausreichend, zu lang	ausreichend (-0,50)
9	Warmhaltezeit	≈20 oder weniger, ≈20-40, ≈40-60, ≈60-80, ≈80-100, ≈100-120, ≈120-140, ≈140-160, ≈160-180, ≈180-200, ≈200 min oder mehr	≈120-140 min (0,20)
10	Warmhaltetemperatur	≈700 oder weniger, ≈700-730, ≈730-760, ≈760-790, ≈790-820, ≈820 C oder mehr	≈820 C oder mehr (1)
11	Schmelzbadoberfläche	wenig sauber, saubere	saubere (0,40)

Tabelle 4-4. Anfangswerte der Eigenschaften des Prozessablaufs

Für die folgenden Faktoren werden keine Anfangswerte notwendig:



1. Formfüllungsgeschwindigkeit
2. Oxide in der Schmelze
3. Oxidbildung während der Formfüllung (Verschäumung)
4. Metallgeschwindigkeit im Eingusskanal
5. Luftmitnahme während des Gießens
6. Gasgehalt der Schmelze
7. Speisung
8. Gerichtete Erstarrung

### **Eigenschaften des Gussstücks**

Die Gruppe Eigenschaften des Gussstückes besteht aus 4 Faktoren. Davon bestimmen 2 Faktoren die Eingangssituation durch Anfangswerte (Tabelle 4-5).

Nr.	Faktor	Mögliche Werte	Anfangswert
1	Wanddicke des Gussteils (min)	6-12 mm	6,00 mm (-1,00)
2	Gussteilgeometrie	viele gefährdete Kanten und Ecken mittlere Gefahrstufe unwesentliche Gefahrstufe keine gefährdete Stellen	viele gefährdete Kanten und Ecken (-1)

Tabelle 4-5. Anfangswerte der Gruppe Eigenschaften des Gussstücks

Für die folgenden Faktoren werden keine Anfangswerte notwendig:

1. Gussoberflächenrauheit
2. Festigkeit des Gussteils

### **Gussfehler**

Die Gruppe Gussfehler besteht aus 13 Faktoren. Für alle Faktoren aus dieser Gruppe sind keine Anfangswerte vorhanden:

- |                      |                                     |
|----------------------|-------------------------------------|
| 1. Gas/Luftporosität | 8. Unvollständig ausgelaufener Guss |
| 2. Mikroporosität    | 9. Aussenlunker                     |
| 3. Warmrisse         | 10. Innenlunker                     |
| 4. Kaltlauf          | 11. Einfallstellen                  |
| 5. Oxide             | 12. Versatz                         |
| 6. Kaltrisse         | 13. Grat                            |
| 7. Verzug            |                                     |

### 4.3. Vorbereitung des Modells zur Simulation

Zur Durchführung der Simulationsszenarien sollen von allen Faktoren Zielfaktoren, Steuerfaktoren, Faktoren, die die Anfangssituation bestimmen, und andere innere Faktoren ausgewählt werden.

#### 4.3.1. Zielfaktoren

Als Zielfaktoren wurden in das Modell alle Faktoren der Gussfehlergruppe ausgewählt. Außer den Gussfehlern wurden als Zielfaktoren noch die Kokillenhaltbarkeit und die Gussoberflächerauheit ausgewählt. Das Ziel, das in Idealfall mittels Simulationen erreicht werden soll: besteht in der Verringerung der Probabilität der Gussfehlerentstehung, der Vergrößerung der Kokillenhaltbarkeit und der Reduzierung der mittleren Rautiefe der Gussoberfläche.

Nr.	Faktor	Gewünschte Richtung
1	Gas/LuftPorosität	↓
2	Mikroporosität	↓
3	Warmrisse	↓
4	Kaltlauf	↓
5	Oxide	↓
6	Kokillenhaltbarkeit	↑
7	Kaltrisse	↓
8	Verzug	↓
9	Unvollständig ausgelaufener Guss	↓
10	Außenlunker	↓
11	Innenlunker	↓
12	Einfallstellen	↓
13	Versatz	↓
14	Grat	↓
15	Gussoberflächenrauheit	↓

Tabelle 4-6. Zielfaktoren

#### 4.3.2. Steuerfaktoren

Die Szenarien des Modells können durch folgende Faktoren gesteuert werden, das heißt man kann die Werte der Faktoren innerhalb ihres Definitionsbereichs ändern:

1. Kokillentemperatur
2. Gießzeit
3. Dicke der Schlichte
4. Gießtemperatur

5. Entlüftung der Kokille
6. Gießfilter
7. Kompetenz des Personals
8. Qualität der Schlichte
9. Oberfläche der Schlichte
10. Komplexe Schmelzebehandlung
11. Speiser
12. Veredelung

13. Warmhaltetemperatur
14. Warmhaltezeit
15. Si-Gehalt
16. Mg-Gehalt
17. Dichtheit der Kokille
18. Qualität des Rohstoffes

#### 4.3.3. Prozessfaktoren

Folgende Faktoren gehören nicht zu Ziel- oder Steuerfaktoren:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Schwindung                            | 24. Verschleiß der Zentrier- und Zulegestifte             |
| 2. Fließvermögen                         | 25. Verschleiß der Kokille                                |
| 3. Fe-Gehalt                             | 26. Massgenauigkeit der Kokille                           |
| 4. Mn-Gehalt                             | 27. Formfüllungsgeschwindigkeit                           |
| 5. Cu-Gehalt                             | 28. Oxide in der Schmelze                                 |
| 6. Gasaufnahme der Legierung             | 29. Schmelzbadoberfläche                                  |
| 7. Zn- Gehalt                            | 30. Oxidbildung während der Formfüllung<br>(Verschäumung) |
| 8. Volumendefizit während der Erstarrung | 31. Gießhöhe  |
| 9. Speisungsvermögen                     | 32. Metallgeschwindigkeit im Eingusskanal                 |
| 10. Typ der Erstarrung                   | 33. Querschnitt des Eingussystems                         |
| 11. Kontinuität des Gießstrahls          | 34. Schmelzezeit  |
| 12. Sauberkeit der Gießkelle             | 35. Luftmitnahme während des Gießens                      |
| 13. Auswerfersystem                      | 36. Gießart   |
| 14. Stabilität der Gießmaschine          | 37. Schmelzprozess  |
| 15. Kühlstifte                           | 38. Metalltransport                                       |
| 16. Wanddicke der Kokille                | 39. Gießlage  |
| 17. Innere Spannung der Kokille          | 40. Speisung  |
| 18. Oberflächenzustand der Kokille       | 41. Gerichtete Erstarrung                                 |
| 19. Temperaturdifferenz in der Kokille   | 42. Gasgehalt der Schmelze                                |
| 20. Konstruktion der Kokille             | 43. Festigkeit des Gussteils                              |
| 21. Material der Kokille                 | 44. Wanddicke des Gussteils (min)                         |
| 22. Entformungsschräge                   | 45. Gussteilgeometrie                                     |
| 23. Wärmeverzug der Kokille              |   |

#### 4.4. Verifizierung des Modells

Als Ergebnis der Simulation der Selbstentwicklung der Systemverhältnisse mit vorgegebenen Anfangswerten ergaben sich folgende Zahlen:

Nr.	Faktor	Wert	Innere Werte der Software
1	Gas/LuftPorosität	≈ 3-4%	(0,28)
2	Mikroporosität	≈ 5-6%	(0,41)
3	Warmrisse	≈ 4-5%	(0,36)
4	Kaltlauf	≈ 2-3%	(0,21)
5	Oxide	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss	(0,30)
6	Kaltrisse	≈ 2-3%	(0,23)
7	Verzug	≈ 1-2%	(0,12)
8	Unvollständig ausgelaufener Guss	Niedrige Wahrscheinlichkeit	(-0,21)
9	Aussenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit	(-0,22)
10	Innenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit	(-0,43)
11	Einfallstellen	Niedrige Wahrscheinlichkeit	(-0,15)
12	Versatz	Niedrige Wahrscheinlichkeit	(-0,13)
13	Grat	≈ 1-2%	(0,14)

Tabelle 4-7. Simulationsergebnisse der Selbstentwicklung

Diese Ergebnisse kann man auch graphisch darstellen (siehe Abbildung 4-2).

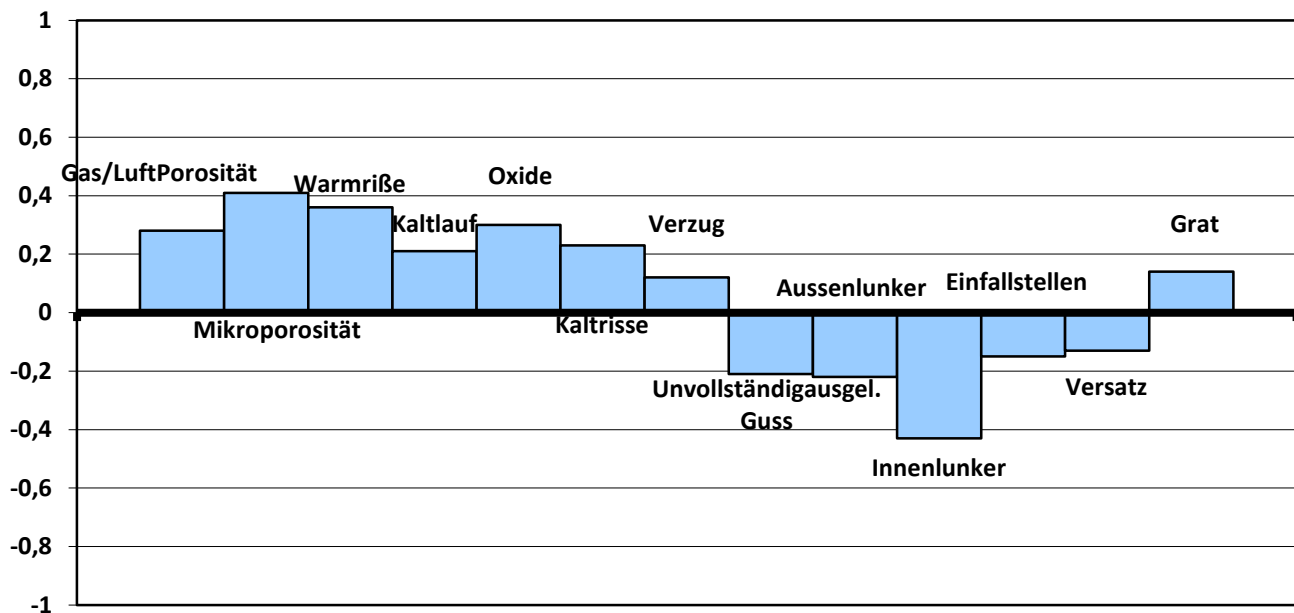


Abbildung 4-2. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse der Selbstentwicklung

Nach statistischen Daten der Aluminium-Gießerei sind folgende Häufigkeiten der Gussfehlerentstehung bekannt:

Nr.	Faktor	Statistisches Wert
1	Porosität (Luft-, Mikro-)	$\approx 12\%$
2	Warmrisse	$\approx 4\%$
3	Oxide	$\approx 3\%$
4	Kaltrisse	$\approx 2\%$
5	Alle Anderen außer Grat	$\approx 2-4\%$

Tabelle 4-8. Statistische Daten vom Unternehmen

Die Simulationsergebnisse und die statistischen Daten wurden in Tabelle 4-9 gegenüber gestellt.

Nr.	Faktor	Simulationsergebnisse	Statistisches Wert
1	Porosität (Gas/Luft-, Mikro-)	$\approx 8-10\%$	$\approx 12\%$
2	Warmrisse	$\approx 4-5\%$	$\approx 4\%$
3	Oxide	vorhandene Oxide, $\approx 3-4\%$ Ausschuss	$\approx 3\%$
4	Kaltrisse	$\approx 2-3\%$	$\approx 2\%$
5	Alle anderen außer Grat	$\approx 4-7\%$	$\approx 4\%$

Tabelle 4-9. Vergleich der Simulationsergebnisse mit statistischen Daten

Im Unternehmen wurden bei der Sammlung der statistischen Daten zwischen den Gussfehlern Gas/Luftporosität und Mikroporosität nicht unterschieden. Deshalb wurde für die Verifizierung des Modells die Summe der Häufigkeiten der Gussfehler angenommen. Die berechnete akkumulierte Häufigkeit liegt zwischen 8-10%. Laut Expertenmeinung ist dieser Wert glaubwürdig, da mit 12% ein maximal möglicher Wert im Betrieb auftritt. Laut Statistik kann die Häufigkeit der Warmrisse bis zu 4% erreichen, und mit der Simulation wurden 4 bis 5% erzielt. Vorhandene Oxide führen nicht immer zu Ausschuss. Entsprechend der Simulation ist Ausschuss bei 3-4% zu erwarten, was nach Expertenmeinung glaubwürdig ist. Die Häufigkeiten der Kaltrisse und aller anderen Gussfehler außer Grat stimmen gut mit der Statistik überein. Niedrige Wahrscheinlichkeit wurde als Null-Häufigkeit interpretiert. Laut Simulationsergebnisse ist der Gussfehler unvollständig ausgelauener Guss sehr unwahrscheinlich und tritt kaum auf. Die Statistik für den Gussfehler Grat wurde nie im Unternehmen gesammelt und die statistische Häufigkeit ist nicht bekannt.

Auf der Basis der Simulationsergebnisse ist es möglich, den Gesamtfehler zu berechnen. Der Gesamtfehler entspricht der maximalen Anzahl der fehlerhaften Teile und kann als die Summe der Häufigkeiten aller entstehenden Gussfehler berechnet werden. Es werden nur die Situationen be-

rücksichtigt, wenn ein Gußteil nur ein Gussfehler hat. Falls ein Gussteil mehrere Gussfehler hat, dann wird die Anzahl der fehlerhaften Teile weniger.

Im vorliegenden Fall ist der Gesamtfehler des Systems ohne äußere Steuerungen 21-29%. Laut statistischer Daten beträgt die Gesamtfehlerzahl des Gussstückes unter den vorgegebenen Anfangsbedingungen im Unternehmen bis zum 23%. Also stimmen die Simulationsergebnisse mit den statistischen Daten gut überein. Die Statistik bestätigt die Gültigkeit der Simulationsergebnisse. Das heißt, alle Faktoren und Verbindungen zwischen ihnen wurden richtig bewertet. Alle Experten des Unternehmens sind mit den Simulationsergebnissen einverstanden. Infolge der genannten Ursachen kann das Modell und die Methodik als arbeitsfähig bewertet werden und glaubwürdige Ergebnisse bei anderen Simulationen (gesteuerte Entwicklungen) zeigen.

#### **4.5. Gesteuerte Entwicklung**

Wenn das Modell in der Software Strategist eingesetzt wird, dann kann man das dynamische Systemverhalten analysieren. Das heißt, man kann solche Bedingungen des Prozess finden, bei denen die Gussfehlerzahl verringert wird. Diese Verhältniskorrektur kann man mittels Außensteuerungen verwirklichen. Von der Gesamtheit der Steuerfaktoren wurden in Zusammenarbeit mit den Experten der Vorzugssteuerhebel ausgewählt. Von den einzelnen Steuerungen oder von den Kombinationen der ausgewählten Steuerfaktoren kann man verschiedene Szenarien zusammenstellen. Danach muss man nur den gewünschten Steuerwert eingeben und eine Simulation durchführen.

Es wurden folgende Szenarien vorbereitet:

1. Gießtemperatur
2. Kokillentemperatur
3. Gießzeit/Querschnitt des Eingusssystems
4. 1. kombiniertes Szenarium: Gießtemperatur/ Kokillentemperatur/ Gießzeit/ Querschnitt des Eingusssystems
5. 2. kombiniertes Szenarium: Veredelung/ Komplexe Schmelzebehandlung/ Gießzeit/Querschnitt des Eingusssystems
6. Kompetenz des Personals

### 4.5.1. Szenarium Gießtemperatur

Das Szenarium wurde zur Analyse des Systemverhaltens nach einer Senkung der Gießtemperatur von 800-820, C auf 760-780, C erstellt.

Steuerfaktor	Gießtemperatur	Innere Werte
Anfangswert	≈800-820 C	0,95
Steuerimpuls	Senkung um ≈60 C	-0,6
Steuerwert	≈760-780 C	-0,35

Tabelle 4-10. Steuerung des Szenariums Gießtemperatur

Nach der Gießtemperatursenkung werden folgende Systemverhältnisse beobachtet:

Nr.	Faktor	Selbstentwicklung	Gesteuerte Entwicklung
1	Gas/LuftPorosität	≈ 3-4% (0,28)	≈ 2-3% (0,22)
2	Mikroporosität	≈ 5-6% (0,41)	≈ 8-9% (0,65)
3	Warmrisse	≈ 4-5% (0,36)	≈ 4-5% (0,36)
4	Kaltlauf	≈ 2-3% (0,21)	≈ 8-9% (0,64)
5	Oxide	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss (0,30)	vorhandene Oxide, kein Ausschuss (-0,12)
6	Kaltrisse	≈ 2-3% (0,23)	≈ 2-3% (0,23)
7	Verzug	≈ 1-2% (0,12)	≈ 1-2% (0,12)
8	Unvollständig ausgel. Guss	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,21)	≈ 3-4% (0,26)
9	Aussenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)	≈ 0-1% (0,02)
10	Innenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,43)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,19)
11	Einfallstellen	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,15)	≈ 0-1% (0,09)
12	Versatz	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,42)
13	Grat	≈ 1-2% (0,14)	≈ 0-1% (0,01)

Tabelle 4-11. Simulationsergebnisse des Szenariums Gießtemperatur

Die graphische Darstellung der Simulationsergebnisse ist in der Abbildung 4-3 gezeigt.

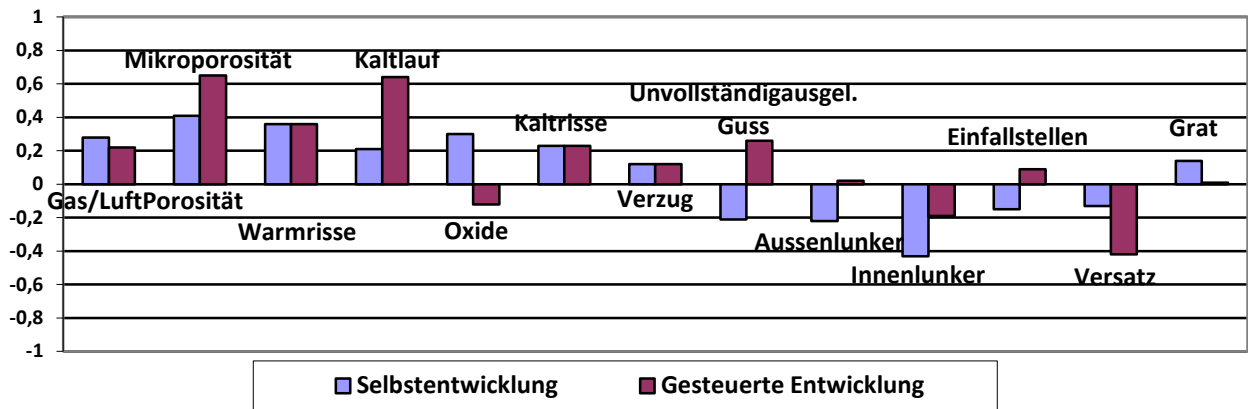


Abbildung 4-3. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Gießtemperatur

### Beschreibung der Ergebnisse

Die Änderung der Gießtemperatur führt zu unterschiedlichen Änderungen bezüglich der verschiedenen Gussfehler. Die Häufigkeit des Gussfehler Kaltlauf hat sich bedeutend vergrößert bis auf  $\approx 8-9\%$ . Infolge der Senkung der Gießtemperatur und der komplizierten Gussteilgeometrie steigt das Risiko der vorzeitigen Erstarrung. Die Aktivität der Prozesse der Oxidbildung wird mit Senkung der Gießtemperatur auch sinken. Infolgedessen werden in der Schmelze weniger Oxide gebildet und die Schmelze füllt die Form schneller, dadurch wird die Häufigkeit der Gas/Luftporosität etwas weniger  $\approx 2-3\%$  statt  $\approx 3-4\%$ . Infolge der Temperatursenkung entstehen die Gussfehler Aussenlunker (bis zu  $\approx 0-1\%$ ), Einfallstellen (bis zu  $\approx 0-1\%$ ) und es erhöht sich die Häufigkeit der Mikroporosität (statt  $\approx 5-6\%$  bis auf  $\approx 8-9\%$ ), weil es bei niedrige Gießtemperatur schwierig ist, eine gerichtete Erstarrung einzustellen. Der Gussfehler Grat tritt seltener auf (statt  $\approx 1-2\%$  nur  $\approx 0-1\%$ ), weil bei niedrigeren Temperaturen keine starken Wärmespannungen auf treten und der Wärmeverzug der Kokille wird geringer.

Als Ergebnis wurde der Gesamtfehler in diesem Szenarium im Gegensatz zu Selbstentwicklung von 21-29% auf 28-38% gesteigert. Dass heißt, die Situation hat sich verschlechtert.

### 4.5.2. Szenarium Kokillentemperatur

Das Szenarium wurde zur Analyse des Systemverhaltens nach einer Senkung der Kokillentemperatur um 50 C erstellt.



Steuerfaktor	Kokillentemperatur	Innere Werte
Anfangswert	≈475-500 C	0,70
Steuerimpuls	Senkung um ≈75 C	-0,50
Steuerwert	≈425-450 C	0,20

Tabelle 4-12. Steuerung des Szenariums Kokillentemperatur

Nach der Kokillentemperatursenkung werden folgende Systemverhältnisse beobachtet:

Nr.	Faktor	Selbstentwicklung	Gesteuerte Entwicklung
1	Gas/LuftPorosität	≈ 3-4% (0,28)	≈ 3-4% (0,28)
2	Mikroporosität	≈ 5-6% (0,41)	≈ 7-8% (0,61)
3	Warmrisse	≈ 4-5% (0,36)	≈ 5-6% (0,42)
4	Kaltlauf	≈ 2-3% (0,21)	≈ 5-6% (0,45)
5	Oxide	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss (0,30)	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss (0,30)
6	Kaltrisse	≈ 2-3% (0,23)	≈3-4% (0,26)
7	Verzug	≈ 1-2% (0,12)	≈3-4% (0,26)
8	Unvollständig ausgel. Guss	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,21)	≈ 0-1% (0,04)
9	Aussenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)	≈ 0-1% (-0,02)
10	Innenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,43)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,23)
11	Einfallstellen	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,15)	≈ 0-1% (0,05)
12	Versatz	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,48)
13	Grat	≈ 1-2% (0,14)	≈ 0-1% (-0,01)

Tabelle 4-13. Simulationsergebnisse des Szenariums Kokillentemperatur

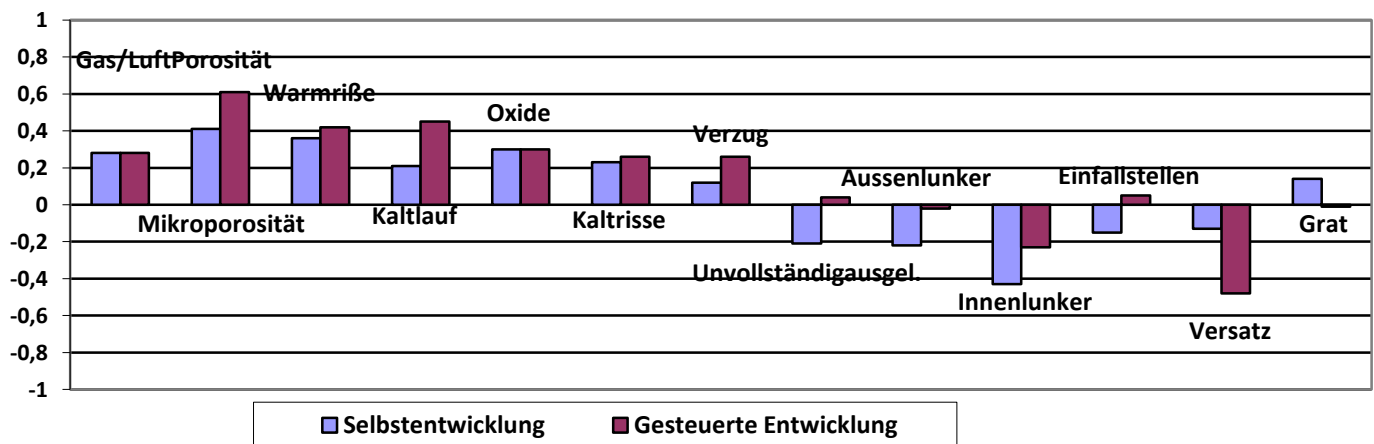


Abbildung 4-4. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Kokillentemperatur

## Beschreibung der Ergebnisse

Die Änderung der Kokillentemperatur wirkt sich auf fast alle Gussfehler aus. Die Häufigkeit der Warmrisse erhöht sich bis zu  $\approx 5\text{-}6\%$  statt  $\approx 3\text{-}4\%$ , der Kaltrisse bis zu  $\approx 3\text{-}4\%$  statt  $\approx 1\text{-}2\%$ . Bei niedrigen Kokillentemperaturen steigt die innere Spannung der Kokille, so dass die Kokillenhälften nicht mehr einwandfrei geschlossen werden, was bei der Erstarrung zu Rissen führt. Auf Grund steigender innerer Spannung der Kokille tritt auch der Gussfehler Verzug (bis max  $\approx 3\text{-}4\%$ ) auf. Bei niedrigen Kokillentemperaturen steigt auch das Risiko des Kaltlaufs bis zu  $\approx 5\text{-}6\%$ . Bei niedrigen Temperaturen ist es schwer eine gerichtete Erstarrung zu erreichen, dadurch entsteht die Gefahr von Außenlunkern (bis zu max.  $\approx 1\%$ ), von Einfallstellen (bis zu max.  $\approx 1\%$ ) und von Mikroporosität (bis  $\approx 7\text{-}8\%$  statt  $\approx 5\text{-}6\%$ ).

Der Gesamtfehler ohne Steuerungen liegt bei 21-29%, nach dem Szenarium Kokillentemperatur bei 30-42%. Die Situation hat sich im Endergebnis verschlechtert.

### 4.5.3. Gießzeit/Querschnitt des Eingusssystems

Das Szenarium wurde zur Analyse des Systemverhaltens nach der Senkung der Gießzeit von 20-25 Sekunden bis auf 10-15 Sekunden und gleichzeitlicher Vergrößerung des Querschnittes des Eingusssystems von 4,1 auf 5,0 cm<sup>2</sup> erstellt.

Steuerfaktor	Gießzeit	Innere Werte
Anfangswert	$\approx 20\text{-}25$ Sek	0,60
Steuerimpuls	Senkung auf $\approx 10$ Sek	-0,70
Steuerwert	$\approx 10\text{-}15$ Sek	-0,10

Tabelle 4-14. Steuerung: Gießzeit

Steuerfaktor	Querschnitt des Eingusssystems	Innere Werte
Anfangswert	$\approx 4,1$ cm <sup>2</sup>	0,40
Steuerimpuls	Vergrößerung auf $\approx 0,9$ cm <sup>2</sup>	0,60
Steuerwert	$\approx 5,0$ cm <sup>2</sup>	1,00

Tabelle 4-15. Steuerung: Querschnitt des Eingusssystems

Nach der Senkung der Gießzeit und der Vergrößerung des Querschnittes des Eingusssystems werden folgende Systemverhältnisse beobachtet:

Nr.	Faktor	Selbstentwicklung	Gesteuerte Entwicklung
1	Gas/LuftPorosität	≈ 3-4% (0,28)	≈ 3-4% (0,33)
2	Mikroporosität	≈ 5-6% (0,41)	≈ 3-4% (0,29)
3	Warmrisse	≈ 4-5% (0,36)	≈ 4-5% (0,36)
4	Kaltlauf	≈ 2-3% (0,21)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,14)
5	Oxide	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss (0,30)	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss (0,33)
6	Kaltrisse	≈ 2-3% (0,23)	≈ 2-3% (0,23)
7	Verzug	≈ 1-2% (0,12)	≈ 1-2% (0,12)
8	Unvollständig ausgel. Guss	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,21)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,25)
9	Aussenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,40)
10	Innenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,43)	Unwahrscheinlich (-0,56)
11	Einfallstellen	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,15)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)
12	Versatz	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)
13	Grat	≈ 1-2% (0,14)	≈ 1-2% (0,14)

Tabelle 4-16. Simulationsergebnisse des Szenariums Gießzeit

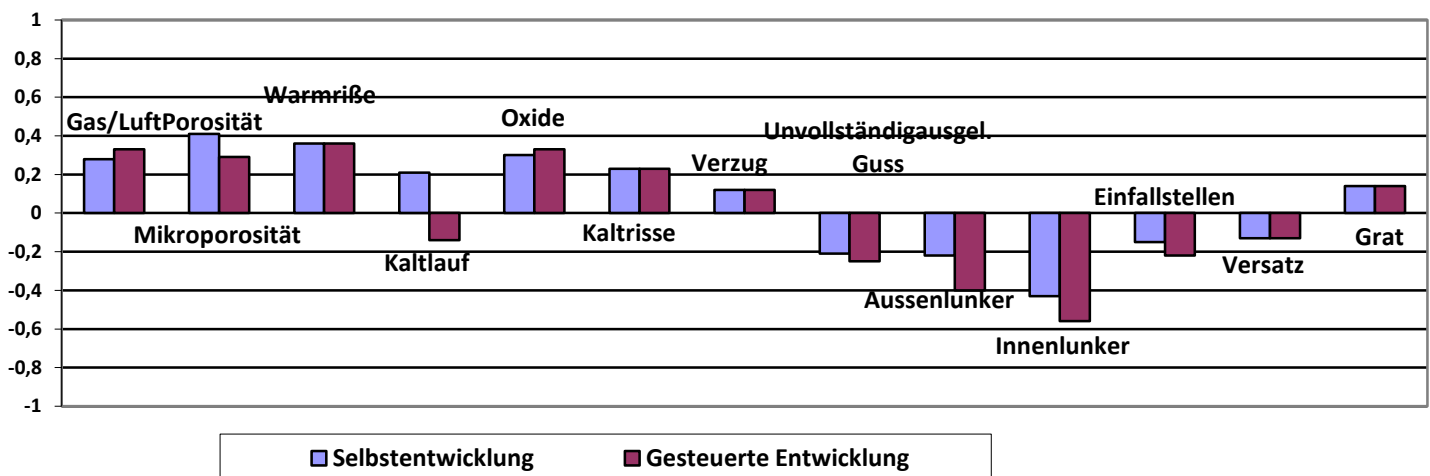


Abbildung 4-5. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Gießzeit

## Beschreibung der Ergebnisse

Bei Verringerung der Gießzeit und der Vergrößerung des Querschnittes des Eingussystems verringert sich die Gefahr der Kaltläufe. Alle anderen Parameter ändern sich unbedeutend.

Der Gesamtfehler ohne Steuerungen beträgt 21-29%, nach dem Szenarium Gießzeit liegt er bei 16-20%. Die Situation hat sich im Endergebnis ein bisschen verbessert.

#### **4.5.4. 1. kombiniertes Szenarium: Gießtemperatur/ Kokillentemperatur/ Gießzeit/ Querschnitt des Eingusssystems**

Nach der Durchführung der 3 einzelnen Szenarien wurden die gewünschten Richtungen der Steuerungen ermittelt. Die Senkung der Gießtemperatur führt zur Verschlechterung der Situation und der Erhöhung der Häufigkeit der Mikroporosität, des Kaltlaufs und des unvollständig ausgelaufenen Gusses. Dadurch wird vermutet, dass die Steigerung der Gießtemperatur zur Verbesserung der Situation bei den oben genannten Gussfehlern führen soll. Ebenso wird vermutet, dass die Steigerung der Kokillentemperatur zur Verbesserung führen sollte. Bei der Durchführung des Szenariums Gießzeit/Querschnitt des Eingusssystems wurde eine schwache Verbesserung der Situation beobachtet. Die Häufigkeit der Mikroporosität und des Kaltlaufs wurden gesenkt. Deshalb wurde die richtige Änderungsrichtung ermittelt.

In diesem Szenarium wurden 4 ausgewählte Steuerungen in Richtung der Situationsverbesserung geändert.

Steuerfaktor	Gießtemperatur	Innere Werte
Anfangswert	≈800-820 C	0,95
Steuerimpuls	Steigerung um ≈20 C	0,05
Steuerwert	≈820 C oder mehr	1,00

Tabelle 4-17. Steuerung: Gießtemperatur

Steuerfaktor	Kokillentemperatur	Innere Werte
Anfangswert	≈475-500 C	0,70
Steuerimpuls	Steigerung um ≈25 C	0,30
Steuerwert	≈500 C oder mehr	1,00

Tabelle 4-18. Steuerung: Kokillentemperatur

Steuerfaktor	Gießzeit	Innere Werte
Anfangswert	≈20-25 Sek	0,60
Steuerimpuls	Senkung um ≈5Sek	-0,15
Steuerwert	≈15-20 Sek	0,45

Tabelle 4-19. Steuerung: Gießzeit

Steuerfaktor	Querschnitt des Eingusssystems	Innere Werte
Anfangswert	$\approx 4,1 \text{ cm}^2$	0,40
Steuerimpuls	Vergrößerung auf $\approx 0,2 \text{ cm}^2$	0,15
Steuerwert	$\approx 4,3 \text{ cm}^2$	0,55

Tabelle 4-20. Steuerung: Querschnitt des Eingusssystems

Nach der Änderung der Parameter werden folgende Systemverhältnisse beobachtet:

Nr.	Faktor	Selbstentwicklung	Gesteuerte Entwicklung
1	Gas/LuftPorosität	$\approx 3\text{-}4\%$ (0,28)	$\approx 3\text{-}4\%$ (0,29)
2	Mikroporosität	$\approx 5\text{-}6\%$ (0,41)	$\approx 2\text{-}3\%$ (0,24)
3	Warmrisse	$\approx 4\text{-}5\%$ (0,36)	$\approx 3\text{-}4\%$ (0,32)
4	Kaltlauf	$\approx 2\text{-}3\%$ (0,21)	$\approx 0\text{-}1\%$ (-0,05)
5	Oxide	vorhandene Oxide, $\approx 3\text{-}4\%$ Ausschuss (0,30)	vorhandene Oxide, $\approx 4\text{-}5\%$ Ausschuss (0,34)
6	Kaltrisse	$\approx 2\text{-}3\%$ (0,23)	$\approx 2\text{-}3\%$ (0,21)
7	Verzug	$\approx 1\text{-}2\%$ (0,12)	$\approx 0\text{-}1\%$ (0,04)
8	Unvollständig ausgel. Guss	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,21)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,39)
9	Aussenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,40)
10	Innenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,43)	Unwahrscheinlich (-0,61)
11	Einfallstellen	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,15)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,31)
12	Versatz	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)	$\approx 1\text{-}2\%$ (0,11)
13	Grat	$\approx 1\text{-}2\%$ (0,14)	$\approx 2\text{-}3\%$ (0,24)

Tabelle 4-21. Simulationsergebnisse des 1. kombinierten Szenariums

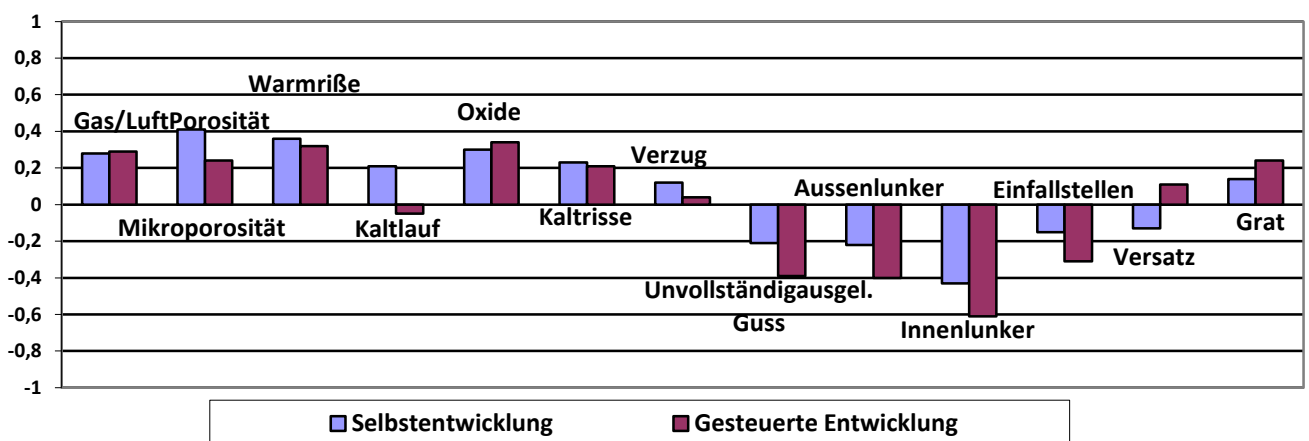


Abbildung 4-6. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des 1. kombinierten Szenariums

## Beschreibung der Ergebnisse

Die bedeutende Verbesserung wurde bei den Gussfehlern: Mikroporosität, Kaltlauf und Verzug beobachtet. Der Gussfehler Versatz tritt dagegen häufiger auf, führt aber nicht immer zu Ausschuss. In den meisten Fällen kann der Gussfehler durch Nacharbeit entfernt werden.

Der Gesamtfehler ohne Steuerungen beläuft sich auf 21-29%, nach dem kombinierten Szenarium findet man nur 13-21%. Die Situation hat sich im Endergebnis ein bisschen verbessert.

### 4.5.5. 2. kombiniertes Szenarium: Veredelung/ Komplexe Schmelzebehandlung/ Gießzeit/Querschnitt des Eingusssystems

Kombinierte Szenarien – sind die Szenarien der gesteuerten Entwicklung mit mehreren Steuerfaktoren. Die Steuerungen sollen gleichzeitig eingegeben werden. Im weiteren Beispiel werden die Simulationen mit jeder Steuerung getrennt berechnet und dann zusammen, um die gesamte Wirkung alle Steuerungen zu zeigen.

Steuerfaktor	Veredelung	Innere Werte
Anfangswert	gelungene Veredelung	0,40
Steuerimpuls	Verbesserung	0,30
Steuerwert	gelungene Veredelung	0,70

Tabelle 4-22. Steuerung: Veredelung

Steuerfaktor	Komplexe Schmelzebehandlung	Innere Werte
Anfangswert	Technologie eingehalten	0,40
Steuerimpuls	Verbesserung der Bedingungen	0,30
Steuerwert	Technologie eingehalten	0,70

Tabelle 4-23. Steuerung: Komplexe Schmelzebehandlung

Steuerfaktor	Gießzeit	Innere Werte
Anfangswert	≈20-25 Sek	0,60
Steuerimpuls	Senkung um ≈10 Sek	-0,15
Steuerwert	≈15-20 Sek	0,45

Tabelle 4-24. Steuerung: Gießzeit

Steuerfaktor	Querschnitt des Eingusssystems	Innere Werte
Anfangswert	4,1 cm <sup>2</sup>	0,40
Steuerimpuls	Vergrößerung um 0,15 cm <sup>2</sup>	0,10
Steuerwert	4,25 cm <sup>2</sup>	0,50

Tabelle 4-25. Steuerung: Querschnitt des Eingusssystems

Nach der Änderung der Parameter werden folgende Systemverhältnisse beobachtet:

Nr.	Faktor	Selbstentwicklung	Gesteuerte Entwicklung
1	Gas/LuftPorosität	≈ 3-4% (0,28)	≈ 0-1% (0,06)
2	Mikroporosität	≈ 5-6% (0,41)	≈ 4-5% (0,36)
3	Warmrisse	≈ 4-5% (0,36)	≈ 4-5% (0,36)
4	Kaltlauf	≈ 2-3% (0,21)	≈ 0-1% (0,06)
5	Oxide	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss (0,30)	vorhandene Oxide, ≈ 0-1% Ausschuss (0,07)
6	Kaltrisse	≈ 2-3% (0,23)	≈ 2-3% (0,23)
7	Verzug	≈ 1-2% (0,12)	≈ 1-2% (0,12)
8	Unvollständig ausgel. Guss	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,21)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,16)
9	Aussenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)
10	Innenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,43)	Unwahrscheinlich (-0,55)
11	Einfallstellen	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,15)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)
12	Versatz	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)
13	Grat	≈ 1-2% (0,14)	≈ 1-2% (0,14)

Tabelle 4-26. Simulationsergebnisse des 2. kombinierten Szenariums

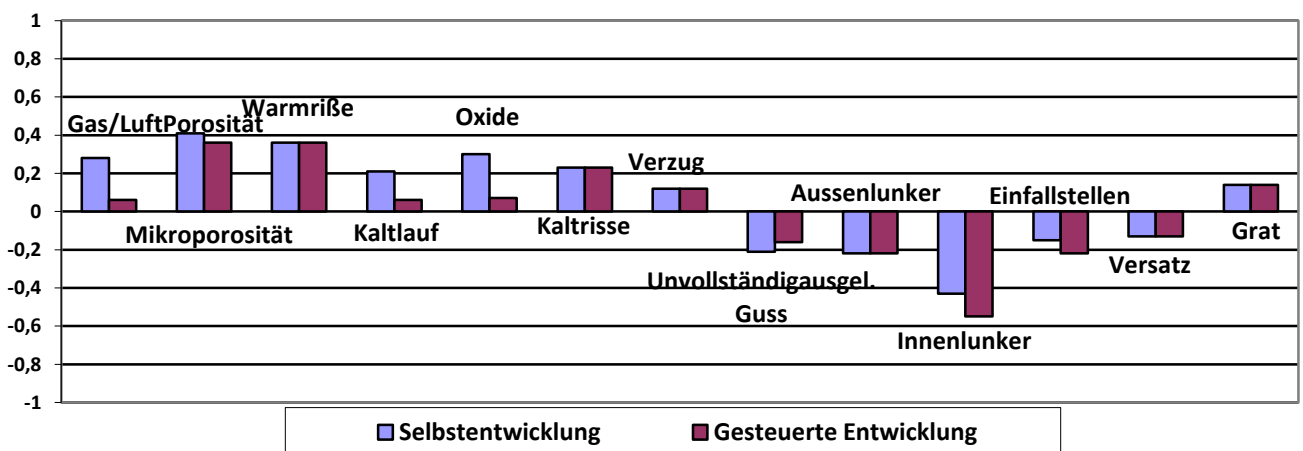


Abbildung 4-7. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des 2. kombinierten Szenariums

## Beschreibung der Ergebnisse

Der Gesamtfehler ohne Steuerungen beträgt 21-29%, nach dem kombinierten Szenarium nur noch 12-20%. Die Situation hat sich im Endergebnis bedeutend verbessert. Ein solches Ergebnis ist nur bei einer gleichzeitigen Kombination der Steuerungen möglich. Jede einzelne Steuerung wirkt auf bestimmte Gussfehler. Die Verbesserung der Situation kann nur dann erreicht werden, wenn aller Gussfehler gezielt bekämpft werden.

In der Realität ist es ganz schwer, solch gute Ergebnisse zu erreichen. Zum Beispiel, für den Faktor „komplexe Schmelzebehandlung“ wurde am Anfang schon der Anfangswert „Technologie eingehalten“ ausgewählt. Aber bei der Simulation konnte der Wert noch verbessert werden. Das bedeutet nicht, dass die Technologie nicht gut genug eingehalten wurde, sondern die Technologie könnte noch verbessert werden. Die Software zeigt mögliche Steuerhebel und ihre Änderungsrichtungen für weitere mögliche Verbesserungen. Der Experte soll selbst entscheiden, ob die Verbesserung in der Richtung möglich ist. Ebenfalls dokumentiert die Software, dass es gut wäre, wenn die Entlüftung der Kokille noch verbessern würde. Der Experte soll entscheiden, ob es überhaupt in Rahmen des Betriebes realisierbar ist.

### 4.5.6. Szenarium Kompetenz des Personals

Das Szenarium wurde zur Analyse des Systemverhaltens nach der Änderung des Parameters Kompetenz des Personals erstellt.

Steuerfaktor	Kompetenz des Personals	Innere Werte
Anfangswert	Hohe	0,20
Steuerimpuls	Verbesserung der Qualifikation	0,70
Steuerwert	Sehr hohe	0,90

Tabelle 4-27. Steuerung: Kompetenz des Personals

Nach der Änderung des Parameters Kompetenz des Personals werden folgende Systemverhältnisse beobachtet:



Nr.	Faktor	Selbstentwicklung	Gesteuerte Entwicklung
1	Gas/LuftPorosität	≈ 3-4% (0,28)	≈ 0-1% (0,04)
2	Mikroporosität	≈ 5-6% (0,41)	≈ 4-5% (0,37)
3	Warmrisse	≈ 4-5% (0,36)	≈ 4-5% (0,36)
4	Kaltlauf	≈ 2-3% (0,21)	≈ 0-1% (-0,08)
5	Oxide	vorhandene Oxide, ≈ 3-4% Ausschuss (0,30)	wenig Oxide, kein Ausschuss (-0,70)
6	Kaltrisse	≈ 2-3% (0,23)	≈ 2-3% (0,23)
7	Verzug	≈ 1-2% (0,12)	≈ 1-2% (0,12)
8	Unvollständig ausgel. Guss	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,21)	Sehr unwahrscheinlich (-0,84)
9	Aussenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,22)	≈ 0-1% (-0,07)
10	Innenlunker	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,43)	Unwahrscheinlich (-0,58)
11	Einfallstellen	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,15)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,15)
12	Versatz	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)	Niedrige Wahrscheinlichkeit (-0,13)
13	Grat	≈ 1-2% (0,14)	≈ 1-2% (0,14)

Tabelle 4-28. Simulationsergebnisse des Szenariums Kompetenz

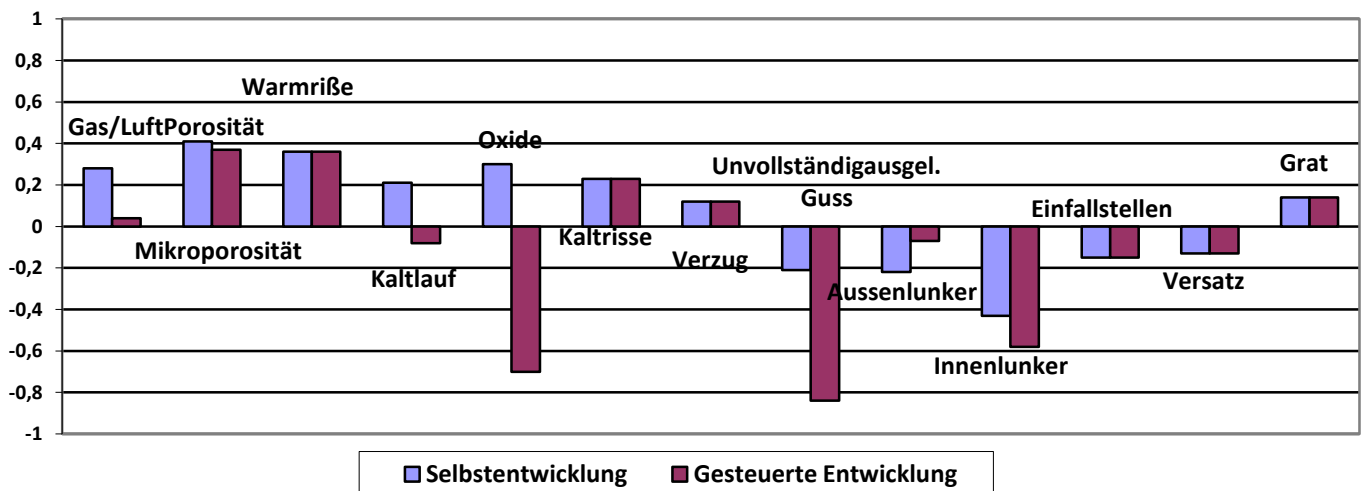


Abbildung 4-8. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Kompetenz

### Beschreibung der Ergebnisse

Kompetenz des Personals ist entscheidend für solche Gussfehler, wie z.B. Gas/Luftporosität, Kaltlauf und Oxide. Der menschliche Faktor spielt eine große Rolle in vielen Gebieten.

Der Gesamtfehler ohne Steuerungen liegt bei 21-29%, nach dem Szenarium Kompetenz bei 12-20%. Die Situation hat sich im Endergebnis dank Weiterbildung des Personals bedeutend verbessert.

#### 4.6. Effizienz der Szenarien

Um die Wirksamkeit der Szenarien zu beurteilen, muss man die Simulationsergebnisse entweder beim Gesamtfehler oder mittels Entscheidungsregel vergleichen.







Nr.	Szenarium	Gesamtfehler	Wirksamkeit
1	Selbstentwicklung	21-29%	
2	Gießtemperatur	28-38%	
3	Kokillentemperatur	30-42%	
4	Gießzeit	16-20%	
5	1. kombiniertes Szenarium	13-21%	
6	2. kombiniertes Szenarium	12-20%	
7	Kompetenz	12-20%	

Tabelle 4-29. Wirksamkeit der Szenarien

Nach der Berechnung der Gesamtfehlerzahl hat sich das Endergebnis nach der Simulation der Szenarien Gieß- und Kokillentemperatur im Vergleich zur Selbstentwicklung verschlechtert. Vier weitere Szenarien zeigen Verbesserungen der Situation, das heißt, die Gesamtgussfehlerzahl nach dem Einsetzen der Steuerhebel hat sich verringert.

Die andere Möglichkeit, die Effizienz der Szenarien zu bewerten, sind die Entscheidungsregeln. Um die Entscheidungsregeln dafür anzuwenden, muss man eine Entscheidungsmatrix aus den Simulationsergebnissen zusammenstellen (Tabelle 4-32, Seite 109). Die Entscheidungsmatrix besteht aus 6 Zeilen und 13 Spalten. Den Zeilen entsprechen die Szenarien der gesteuerten Entwicklung. Den Spalten entsprechen die Gussfehler.

Nach pessimistischer Maximin-Regel muss man erst die schlechtesten Ergebnisse, die minimalen Gewinn bringen, für jedes Szenarium einzeln bestimmen (nach Formel 2-17  $\min_{1 \leq j \leq n} a_{ij}$ ). Das heißt, im Fall der Gussstückqualität erhält man minimalen Gewinn, wenn die höchste Gussfehleranzahl vorliegt.

Szenarium \ Fehlerzahl	1. Max Zahl	2. Max Zahl	3. Max Zahl	4. Max Zahl
Gießtemperatur	≈ 8-9%			
Kokillentemperatur	≈ 7-8%			
Gießzeit	≈ 4-5%	≈ 3-4%	≈ 3-4%	≈ 3-4%
1. kombiniertes	≈ 4-5%	≈ 3-4%	≈ 3-4%	≈ 2-3%
2. kombiniertes	≈ 4-5%	≈ 4-5%		
Kompetenz	≈ 4-5%	≈ 4-5%		

Tabelle 4-30. Anwendung der Maximin-Regel

Nach der Simulation beobachtet man beim Szenarium Gießtemperatur das schlechteste Ergebnis bei 8-9% der Mikroporosität und des Kaltlaufs (siehe Tabelle 4-30, Spalte 1. MaxZahl). Beim Szenarium Kokillentemperatur ist die höchste Wahrscheinlichkeit der Gussfehler mit 7-8% bei der Mikroporosität. Beim Szenarium Gießzeit beobachtet man bis zu 4-5% Kaltrisse. Beim kombinierten Szenarium 1 beobachtet man bis zu 4-5% Oxide. Die Szenarien Kompetenz und kombiniertes Szenarium 2 sagen bis zu 4-5% Mikroporosität und Warmrisse vorher.

Ab dem nächsten Schritt muss man die minimale Gussfehlerzahl oder den maximalen Gewinn auswählen, dass heißt  $\max\{(8-9\%), (7-8\%), (4-5\%), (4-5\%), (4-5\%), (4-5\%\}$ . Vier Szenarien haben die höchste Gussfehlerzahl um 4-5% (Gießzeit, 1. Kombiniertes, 2. Kombiniertes, Kompetenz). Um das richtige Szenarium auszuwählen, muss man diese Regel so viele Male wiederholen, bis man ein bestes Szenarium gefunden hat. Im vorliegenden Fall muss man diese Regel vier Mal anwenden, so lange bis man das 1. kombinierte Szenarium auswählt:  $\max\{((3-4\%), (3-4\%), (4-5\%), (4-5\%\}, \max\{((3-4\%), (3-4\%\}, \max\{((3-4\%), (2-3\%\}$  (siehe Tabelle 4-30, Spalten 2., 3., 4. MaxZahl).

Ebenso funktioniert die optimistische Maximax-Regel. Im Gegensatz zu Maximin-Regel muss man die besten Ergebnisse vergleichen. In diesem Fall muss man die Regel laut Formel 2-18 sechs Mal anwenden, so lange bis man das Szenarium Gießzeit gefunden hat (Tabelle 4-31).

Szenarium \ Fehlerzahl	1. Min Zahl	2. Min Zahl	3. Min Zahl	4. Min Zahl	5. Min Zahl	6. Min Zahl
Gießtemperatur	≈ 0	≈ 0	≈ 0			
Kokillentemperatur	≈ 0	≈ 0				
Gießzeit	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
1. kombiniertes	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0		
2. kombiniertes	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0-1%
Kompetenz	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0-1%

Tabelle 4-31. Anwendung der Maximax-Regel

Um die Savage-Regel anzuwenden, muss man die Bedauern-Matrix erstellen. Dafür findet man minimal mögliche Werte für jeden Gussfehler nach der Simulation aller Szenarien, das heißt, in jeder Spalte die minimale Gussfehlerzahl (Tabelle 4-33, Seite 109). Erst danach wird die Bedauern-Matrix zusammengestellt (Tabelle 4-34, Seite 109). Danach wird für jedes Szenarium das maximale Risiko gefunden (Tabelle 4-34, Seite 109, gelbe Felder). Man wählt das Szenarium, das das minimale Risiko zeigt. Im vorliegenden Fall wählt man zwei Szenarien 2. kombiniertes und Kompetenz.

Gussfehler- zahl Szenarium	Gaspo- rosität	Mikro- porosi- tät	Warm- riße	Kaltlauf	Oxide	Kalt- risse	Verzug	Unvoll.. Guss	Aussen- lunker	Innen- lunker	Einfall- stellen	Versatz	Grat
Gießtemperatur	≈ 2-3%	≈ 8-9%	≈ 4-5%	≈ 8-9%	≈ 0	≈ 2-3%	≈ 1-2%	≈ 3-4%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0-1%
Kokillentem- per.	≈ 3-4%	≈ 7-8%	≈ 5-6%	≈ 5-6%	≈ 3-4%	≈ 3-4%	≈ 3-4%	≈ 0-1%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0-1%
Gießzeit	≈ 3-4%	≈ 3-4%	≈ 4-5%	≈ 0	≈ 3-4%	≈ 2-3%	≈ 1-2%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1-2%
1.kombiniertes	≈ 3-4%	≈ 2-3%	≈ 3-4%	≈ 0-1%	≈ 4-5%	≈ 2-3%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1-2%	≈ 2-3%
2. kombiniertes	≈ 0-1%	≈ 4-5%	≈ 4-5%	≈ 0-1%	≈ 0-1%	≈ 2-3%	≈ 1-2%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1-2%
Kompetenz	≈ 0-1%	≈ 4-5%	≈ 4-5%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 2-3%	≈ 1-2%	≈ 0	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1-2%

Tabelle 4-32. Entscheidungsmatrix

Gussfehler- zahl Szenarium	Gaspo- rosität	Mikro- porosi- tät	Warm- risse	Kaltlauf	Oxide	Kalt- risse	Verzug	Unvoll.. Guss	Aussen- lunker	Innen- lunker	Einfall- stellen	Versatz	Grat
Minimalwert	≈ 0-1%	≈ 2-3%	≈ 3-4%	≈ 0	≈ 0	≈ 2-3%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0-1%

Tabelle 4-33. Minimal mögliche Werte für jeden Gussfehler

Gussfehler- zahl Szenarium	Gaspo- rosität	Mikro- porosi- tät	Warm- risse	Kaltlauf	Oxide	Kalt- risse	Verzug	Unvoll.. Guss	Aussen- lunker	Innen- lunker	Einfall- stellen	Versatz	Grat
Gießtemperatur	≈ 2%	≈ 6%	≈ 1%	≈ 8-9%	≈ 0	≈ 0	≈ 1%	≈ 3-4%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0
Kokillentempr	≈ 3%	≈ 5%	≈ 2%	≈ 5-6%	≈ 3-4%	≈ 1%	≈ 3%	≈ 0-1%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0
Gießzeit	≈ 3%	≈ 1%	≈ 1%	≈ 0	≈ 3-4%	≈ 0	≈ 1%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1%
1. kombiniertes	≈ 3%	≈ 0	≈ 0	≈ 0-1%	≈ 4-5%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1-2%	≈ 2%
2. kombiniertes	≈ 0	≈ 2%	≈ 1%	≈ 0-1%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 1%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1%
Kompetenz	≈ 0	≈ 2%	≈ 1%	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0	≈ 1%	≈ 0	≈ 0-1%	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 1%

Tabelle 4-34. Bedauern-Matrix

## **Zusammenfassung**

Als Ergebnis der vorliegenden Arbeit wurde ein nützliches Hilfsmittel auf der Basis der kognitiven Herangehensweise zur Verbesserung der Effizienz der Managemententscheidungen für die Gussausschussverringerung und Qualitätsverbesserung in den Gießereien entwickelt. Das Werkzeug hilft dem Technologen den Mechanismus des Gussfehlerentstehungsprozesses aufzudecken, die Logik der Gussfehlerentstehung zu verstehen und die präventiven Maßnahmen zu testen. Man kann das Werkzeug täglich im Betrieb benutzen, um die strategischen und operativen Entscheidungen rasch und ohne Durchführung der kostspieligen und komplizierten Versuche zu treffen. Auf diese Weise können Kosten und Zeit eingespart werden.

Der innovative Beitrag der vorliegenden Arbeit besteht darin, dass die kognitive Herangehensweise für ein technisches Gebiet aufbereitet und dass für diesen Einsatzfall eine neue Software zur rechnerunterstützten Simulation der Gussfehlererkennungs- Entstehungs- und Vermeidungsprozesse entwickelt wurden.

Nach einer Analyse des Gussqualitätsproblems und der modernen Methoden zur Qualitätsverbesserung in der Gießereibranche wurde in der Dissertation die Methodik des Schaffens und der Anwendung eines kognitiven Informationspräsentationsmodells der Gussfehlerentstehungsprozess für die Qualitätsverbesserung und Gussausschussverringerung in den Gießereien erarbeitet. Auf der Basis der erarbeiteten Methodik wurde ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt. Mit Hilfe der erarbeiteten Methodik und des entwickelten Steuerprogramms wurden Simulationen durchgeführt, um die Managemententscheidungen auszuprobieren.

Die Dissertation wurde in vier Hauptteilen formuliert. In Teil 1 wurde eine Analyse der Grundmethoden zur allgemeinen Qualitätsverbesserung und insbesondere in der Gießereibranche ausgewertet, wobei klar wurde, dass die Qualitätsfrage in den Gießereien immer noch aktuell ist. Es wurde vorgeschlagen, das System der Gussstückqualitätsverbesserung als schwachstrukturiertes System zu betrachten. Für das Treffen der Entscheidungen in solchen Systemen benutzt man Entscheidungsunterstützungssysteme. Besonders bequem kann man die ablaufenden Prozesse mittels kognitiver Karten veranschaulichen. Die kognitive Arbeitsweise wurde schon bei mehreren schwachstrukturierten Systemen getestet. Unter diesem Blickwinkel kann man dem System eines Gussqualitätsmanagements vergleichbare Eigenschaften zu ordnen, so dass die kognitive Modellierung auf diesem Gebiet arbeitsfähig und sehr hilfreich sein sollte. Nach der Analyse der modernen

Qualitätstechniken wurde ein auf kognitiven Aspekten basiertes Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt. Dabei wurde entschieden, ein neues kognitives Entscheidungsunterstützungssystem zu entwickeln, um den Prozess der Gussfehlerentstehung sehr deutlich transparent zu machen, das gesamte komplizierte Netz von Gussfehlerursachen und den erforderlichen Maßnahmen zu ihrer Beseitigung anschaulich darzustellen.

Im Teil 2 wurde die Methodik des Schaffens und der rechentechnischen Simulation der kognitiven Karten zu den Gussstückqualitätsproblemen formuliert. Das kognitive Modell wurde als ein gerichteter Graph aufgestellt. In diesem Graph sind die Knoten die Faktoren, und die Bogen sind die Kausalverbindungen zwischen den einzelnen Faktoren. Zwei Typen von Faktoren (qualitative und quantitative) und zwei Typen von Verbindungen (qualitative und funktionelle) sind in der Methodik vorgesehen. Solche Darstellung des Problemgebiets als kognitives Modell ermöglicht die Durchführung der Simulationen der verschiedenen Szenarien. Die notwendigen Algorithmen der kognitiven Simulation wurden für das Problem des Qualitätsmanagementsystems adaptiert und Schritt für Schritt beschrieben. In dieser Methodik wurden einige Techniken für die Analyse der kognitiven Karten sowie deren mathematischer Apparat vorgeschlagen. Ebenfalls sind die Methoden für Bewertung der Effizienz von Szenarien beschrieben.

Die erarbeitete Methodik wurde in ein lauffähiges Rechnerprogramm „Strateg“ programmiert, um die Voraussetzungen für eine Simulation des Qualitätszustands je nach Bedingungen auf einem Computer zu schaffen. In Teil 3 wurden die Voraussetzungen zur Entwicklung eines Steuerprogramms für das auf eine kognitive Herangehensweise basierte Entscheidungsunterstützungssystem formuliert.

Die erarbeitete Methodik wurde durch die Simulation des Qualitätszustands unter verschiedenen Anfangsbedingungen und Steuerungen in entwickeltes Steuerprogramm verifiziert und geprüft. In Teil 4 wurden die Ergebnisse der virtuellen Experimente der verschiedenen Szenarien zur Gussstückqualitätsverbesserung beschrieben. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den statistischen Erhebungen einer Aluminium Gießerei wurde die Methodik erfolgreich verifiziert. Als der Erfolgsfaktor des Szenariums wurde der Parameter Gesamtfehler ausgewählt. Der Gesamtfehler ist maximal der Anzahl der fehlerhafte Teile und kann als die Summe der Häufigkeiten aller entstehende Gussfehler berechnet werden. Nach statistischen Daten der Aluminium-Gießerei beträgt die Gesamtfehlerzahl des Gussstückes unter den vorgegebenen Anfangsbedingungen im Unternehmen bis zum 23%. Die Simulationsergebnisse unter gleichen Anfangsbedingungen stimmten mit den statistischen Daten gut überein. Infolge dessen kann das Modell und die dessen Erarbeitungsme-

thodik als arbeitsfähig bewertet werden und glaubwürdige Ergebnisse bei anderen Simulationen (gesteuerten Entwicklungen) zeigen.

Nach der Verifizierung der Ergebnisse wurden einige zusätzliche Simulationsszenarien erstellt und gespielt. Für die Durchführung der Simulationsszenarien wurden Zielfaktoren und Steuerfaktoren aus allen Faktoren ausgewählt. Auf diese Weise wurde 6 Szenarien insgesamt simuliert, wobei man die Gussfehlerzahl durch die Änderungen der wichtigsten Steuerfaktorenwerte versuchte zu verringern. Die Wirksamkeit der Szenarien wurde nach der Zahl der Gesamtfehler bewertet. Die deutliche Verringerung der Gesamtfehlerzahl wurde bis zum 12% nach einigen Szenarien erfolgreich erreicht. Laut Expertenmeinung sind die Werte glaubwürdig. So können die entwickelte Methodik und die Simulationssoftware als Verfahren für die Qualitätsverbesserung beim Vergießen von Aluminiumlegierungen in Kokillen benutzt werden. Die Effizienz der Szenarien wurde auch mittels Entscheidungsregeln bewertet.

Als Ausblick kann man virtuelle Experimente der anderen Szenarien oder anderer spezieller Gießarten durchführen. Mittels des entwickelten Modells kann man auch andere Problemgebiete des Gießens analysieren, z.B. Energie-, Zeit-, Kosteneinsparungen, Personalausbildung, Betriebssicherheit usw.



## Literaturverzeichnis

1. *Kognitivnoe modelirovanie dlya resheniya zadach upravleniya slabostrukturirovannimi sistemami ili situacijami*. **Z. K. Avdeeva, S. V. Kovriga, D. I. Makarenko**. Moskau. Institut problem upravlenija RAN : Kognitivnyj analiz i upravlenie razvitiem situacij (CASC'2006): Trudy VI Mezhdunarodnoj konferencii, 2006.
2. *DIN EN ISO 9000:2001-01*.
3. **Albrecht, Hans Jürgen**. *Leitfaden Qualitätsmanagement für Metallberufe. Bausteine Qualitätsmanagement (TQM), Statistische Prozeßregelung (SPC)*. 3. Auflage. s.l. : Bildungsverlag EINS Troisdorf, 2003.
4. *DIN EN ISO 9000:2005*.
5. **Brauer, J.P. and Kamiske, G. F.** *Qualitätsmanagement von A - Z: Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1993.
6. Metallgießerei Chemnitz GmbH. [Online] 2012. [Zitat vom: 12. 04 2012.] <http://www.metallgiesserei.biz>.
7. **Jacowski, Tony**. Six Sigma vs. Total Quality Management. [Online] 04 09, 2012. <http://ezinearticles.com/?Comparing-Six-Sigma-and-Total-Quality-Management&id=2336091>.
8. **Franz-Josef, Ebner-Ornig**. 7 elementare QM-Werkzeuge. *Studien Arbeit*. TU Graz : s.n., 2007.
9. **Theden, Colsman**. *Qualitätstechniken. Werkzeuge zur Problemlösung und ständigen Verbesserung (Pocket Power)*. 3. s.l. : Hanser, 2002.
10. **Verlag, Cloodt**. Qualitätsmanagement, Korrelation - Werkzeuge der Qualitätssicherung. <http://www.cloodt.de/3akorrel.pdf>. [Online] [Zitat vom: 13. 04 2012.]
11. **Penfield, Daniel**. Pareto Chart. Abbildung. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pareto\\_chart](http://en.wikipedia.org/wiki/Pareto_chart). [Online] [Cited: April 09, 2012.]
12. **Forrest, George**. Quick Guide to Failure Mode and Effects Analysis. [http://www.isixsigma.com/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=1804:quick-guide-to-failure-mode-and-effects-analysis&Itemid=203](http://www.isixsigma.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=1804:quick-guide-to-failure-mode-and-effects-analysis&Itemid=203). [Online] [Cited: April 09, 2012.]
13. *Process control and data analyzing methods in automatic sand casting foundries*. **V. Rauta, J. Orkas**. Espoo, Finland : s.n., 2007, International Foundry Research/Giessereiforschung 59 (2007) Nr. 1.
14. **Hasse, Stephan**. *Guss- und Gefügefehler. Erkennung, Deutung und Vermeidung von Guss- und Gefügefehlern bei der Erzeugung von gegossenen Komponenten*. 2003.
15. **U.V. Voronin, V.A. Kamaev**. *Atlas liteinij defektov*. 2005.

16. **S&B Industrial Minerals.** *Handbuch der Gussfehler. Formsandbeeinflussbare Fehler und deren Vermeidung.* 3. Auflage 2005.
17. **American Foundrymen's Society (AFS).** *International atlas of casting defects.* 1993. ISBN 0-87433-053-X.
18. **Hilbinger, M.** Vermeidung von Gussfehlern und Prognose von Eigenschaften durch Modellierung. *Druckgusspraxis.* 2 2005, pp. 59-64.
19. **Luther, Gründonner.** Kreativität als Schlüsselqualifikation zur Problemlösung. *Königsweg Kreativität - Powertraining für kreatives Denken.* s.l. : Junfermann Verlag Paderborn, 1998.
20. **Magazin, Projekt.** Problem, Definition im Projektmanagement-Glossar des Projekt Magazins. [Online] [Zitat vom: 13. 04 2012.] <http://www.projektmagazin.de/glossarterm/problem>.
21. **Rudolf Grünig, Richard Kühn.** *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme.* s.l. : Springer-Verlag. ISBN 3-543-20245-5.
22. **Herbert A. Simon, Allen Newell.** *Heuristic Problem Solving: The Next Advance in Operations Research.* s.l. : INFORMS, 1958. Bd. 6.
23. **Lynch, Susan K. Wolcott and Cindy L.** The material on unstructured problem solving. Chicago : Annual meeting of the American Accounting Association, 1996.
24. *Vybor upravljajuwih faktorov pri kognitivnom modelirovanii razlichnyh variantov reshenij.* **Davidov, S.V.** Institut problem upravljenija RAN. : Kognitivnyj analiz i upravljenje razvitiem situacij (CASC'2002): Trudy II Mezhdunarodnoj konferencii., 2002. S. 51-68.
25. *Fuzzy cognitive maps and intelligent decision support. A review.* **Khan, Chong, Quaddus.** Murdoch University, Murdoch, Western Australia : Proceedings of the 2nd Western Australian Workshop. on Information Systems Research, WAWISR 1999, 1999.
26. **Power, Daniel J.** *Decision Support Systems: Frequently Asked Questions.* s.l. : iUniverse Publishing, 2004. 0-595-67045-8.
27. **Yuri Avramenko, Andrzej Kraslawski.** *Case Based Design: Applications in Process Engineering (Studies in Computational Intelligence).* s.l. : Springer, 2008. 3540757058.
28. **Power, Dan.** What are the features of a model-driven DSS? <http://dssresources.com/faq/index.php?action=artikel&id=171>. [Online] DSSResources.COM. [Cited: April 09, 2012.]
29. **Sharda, Ramesh, et al.** Artificial Neural Networks in Decision Support Systems. *Handbook on Decision Support Systems 1. International Handbooks on Information Systems.* s.l. : Springer Berlin Heidelberg, 2008, 26, S. 557-580.

30. *Proseminar "Informatik in der Medizin", Folien.* **Schröter, K.** Berlin : Humboldt-Universität zu Berlin, Institut für Informatik, 2004.
31. *Daten- und Wissensmanagement.* **Bodendorf, Freimut.** Zweite, aktualisierte und erweiterte Auflage, s.l. : Springer-Lehrbuch, 2006. ISBN 10 3-540-28743-4.
32. *Innovations in Machine Learning and Defect Diagnostics.* **R. S. Ransing, M. R. Ransing.** s.l. : World Foundry Congress, 2006.
33. *Expert Network for Die Casing Defect Analysis.* **J. Wang, Y. Jiang, C. Lu, W. Ding.** s.l. : Mater. Sci. Technol., Vol. 19 Nr. 4, 2003.
34. **Hentschel, Prof. B.** Vorlesungsskript "Qualitätsmanagement". Freiberg : TU BAF, 2008.
35. *Analiz situacii v regione i upravlenie razvitiem s pomow'ju kognitivnogo modelirovanija.* **Kamaev V.A., Poljakova I.A., Tihonin A.V., Zabolotskij M.A.** Gurzuf : Informacionnye tehnologii v nauke, obrazovanii i biznese, 2005. Internationale Konferenz.
36. **Kirbs, Bianka.** *Analyse, Weiterentwicklung und Anwendungsmöglichkeiten der Zeiterfassungsmethodik im Konverterstahlwerk.* TU Freiberg : s.n., 2008. Diplomarbeit.
37. **Tolman, E. C.** Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review.* 1948, Vol. 55, pp. 189-208.
38. **Maruyama, Magoroh.** The Second Cybernetics: Deviation-Amplifying Mutual Causal Processes. 1963, S. 164-179.
39. **Axelrod, R.** *Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites.* Princeton University Press, Princeton, NJ : s.n., 1976.
40. **Roberts, F.** *Discrete mathematical models with application to social, biological and enviromental problems.* Rutgers University : Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, 1976. 978-0132141710.
41. *Metodologija kognitivnogo modelirovanija slozhnyh ploho opredelennyh situacij.* **Kulinich, A.A.** Moskau. Institut problem upravlenija RAN : Vtoraja mezhdunarodnaja konferencija po problemam upravlenija 2003, 17-19 Juni 2003. pp. 219-227.
42. *Fuzzy Cognitive Maps.* **Kosko, B.** s.l. : International Journal of Man-Machine Studies, 1986, S. 65-75.
43. *Sravnitelnyy analiz viborochnih kognitivnih kart po stepeni farmalizacii.* **Avdeeva, Z.K.** Moskau : Institut problem upravlenija RAN, 2009. Kognitivnyj analiz i upravlenie razvitiem situacij (CASC'2009): Trudy VIII Mezhdunarodnoj konferencii.
44. **Kosko, Bart.** *Neural networks and fuzzy systems, a dynamical systems approach to machine intelligence.* Prentice Hall : s.n., 1992.
45. *Kognitivnyj podhod v upravlenii.* **Avdeeva, Z. K., et al.** Moskau : Probl. upravlj., 2007, Vol. 3, pp. 2-8.

46. **Fedulov, Aleksandr, et al.** *Komp'juternaja podderzhka slozhnyh organizacionno-tehnicheskikh sistem.* 2002. 5-93517-111-2.
47. *Rule Based Fuzzy Cognitive Maps - Qualitative Systems Dynamics.* **Carvalho, J.P. and Tome, J.A.B.** Atlanta, GA : Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS. 19th International Conference of the North American, 2000. pp. 407-411.
48. *Upravlenie bol'shimi sistemami.* **Zabolotskij M.A., Poljakova I.A., Tihonin A.V.** Moskau : IPU RAN, 2007. Primenenie kognitivnogo modelirovanija v upravlenii kachestvom podgotovki specialistov. Vol. 16, pp. 91-98.
49. *A Balanced Differential Learning algorithm in Fuzzy Cognitive Maps.* **Huerga, A. V.** Barcelona, Spain : Departament de Llenguatges i Sistemes Informàtics, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), C\ Jordi Girona 1-3. E 0834.
50. *Cognitive Map, Mind Mapping und Mnemo-Technik.* **Seifert, Jörg.** s.l. : Alfa-Forum. Zeitschrift für Alphabetisierung und Grundbildung, Winter 2005.
51. **Jette, Antonie.** *Produktplanung im fuzzy front end: Handlungsunterstützungssystem auf der Basis von fuzzy cognitive maps.* s.l. : Deutscher Universitäts Verlag, 2005.
52. *Nechetko-kognitivnyj podhod k upravleniju dinamicheskimi sistemami.* **Paklin, N.B.** Russland : Staatliche Technische Universität Ischewsk, 2003. UDK 519.7.
53. **Projekt Deutscher Wortschatz.** [Online] [Cited: 04 12, 2012.] <http://wortschatz.uni-leipzig.de>.
54. **Graumann:, C. F.** *Grundlagen einer Phänomenologie und Psychologie der Perspektivität. Phänomenologisch-Psychologische Forschungen.* Berlin : De Gruyter, 1960. Vol. 2.
55. *Kognitivnie tehnologii ot neznaniya k ponimaniyu.* **V.I., Maksimov.** s.l. : Institut problem upravlenija RAN. Kognitivnyj analiz i upravlenie razvitiem situacij (CASC'2001): Trudy I Mezhdunarodnoj konferencii. S. 4-42.
56. **Lagerev, Dmitrij Grigor'evich.** *Avtomatizacija razrabotki upravlencheskich reshenij v social'no-jekonomicheskikh sistemah na osnove primenenija nechetkih kognitivnyh modelej.* Bryansk : s.n., 2007. Dissertation.
57. **U.M., Plotinsky.** *Modeli social'nyh processov.* Moskau, Russland : Logos, 2001. Hochschullehrbuch.
58. *Cause, Effect, Efficiency and Soft Systems Models.* **Gregory, Frank.** 4, s.l. : Palgrave Macmillan Journals, Apr. 1993, New Research Directions. The Journal of the Operational Research Society, Bd. 44, S. 333-344.

59. *International PhD Foundry Conference*. **Polyakova, Irina**. Brno University of Technology, Czech Foundrymen Society – CFS : s.n., 3rd June 2009. Research of reasons and avoidance methods of defects in aluminium alloys.
60. **Swingler, Kevin**. *Applying Neural Networks. A practical Guide*. s.l. : Morgan Kaufmann, 1996. <http://matlab.exponenta.ru/neuralnetwork/book4/2.php>. 0126791708.
61. *Shkalirovanie vhodnoj informacii v korabel'nyh sistemah informacionnoj podderzhki*. **E.A.Bubnov**. SpbGETU, IPT RAN : Seminar N22,, 17 April 2001.
62. **Björn Rasch, M. Friese, W. Hofmann, E. Naumann**. *Quantitative Methoden 1*. s.l. : Gabler Wissenschaftsverlage, 2004. 3540201661.
63. **Kudashov, Natalia**. *Anwendung der kognitive Modellierung zur Vorhersage von Gussfehlern*. TU Freiberg : s.n., 2012. Dissertation.
64. **Kotova, Yulia**. *Entwicklung und Implementierung von Programmmodulen zur Simulation gießtechnischer Prozesse*. Freiberg : TU Bergakademie, 2010. Dissertation.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1. Beispiel eines Zertifikates (6) .....	9
Abbildung 1-2. TQM.....	10
Abbildung 1-3. Fehlersammelkarte .....	12
Abbildung 1-4. Beispiel einer Regelkarte (9 S. 17-24) .....	13
Abbildung 1-5. Kohlenstoffgehalt und Festigkeit eines Stahls (3) .....	14
Abbildung 1-6. Beispiele verschiedener Korrelationszahlen (10).....	14
Abbildung 1-7. Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa-Diagramm) (3 S. 29).....	15
Abbildung 1-8. Grafische Darstellung einer Häufigkeitsverteilung (Beispiel Wellenlängen) (9 S. 12-17) .....	15
Abbildung 1-9. Pareto-Diagramm einer Fehleruntersuchung von Titangussteilen (11) .....	16
Abbildung 1-10. Auswahl der Problemlösungsmethoden (21 S. 67).....	23
Abbildung 1-11. Arten von Entscheidungsmodellen (30).....	26
Abbildung 1-12. Entscheidung .....	29
Abbildung 2-1. Maruyamas Modell .....	32
Abbildung 2-2. Klassische kognitive Karte und Adjazenzmatrix (42). .....	33
Abbildung 2-3. Roberts, kantengewichteter Graph zur Analyse des Brennstoffverbrauchs und der Luftverunreinigung in San Diego, Kalifornien .....	34
Abbildung 2-4. Koskos Beispiel (42 S. 73).....	34
Abbildung 2-5. Beispiel einer verallgemeinernden kognitiven Karte .....	36
Abbildung 2-6. Beispiel von Fuzzy-Regel. ....	37
Abbildung 2-7. Sequenzediagramm .....	39
Abbildung 2-8. Gussstückqualitätsbewertungen .....	42
Abbildung 2-9. Ursachen der Gussstückqualität .....	43
Abbildung 2-10. Beispiel der funktionalen Verbindung .....	48
Abbildung 2-11. Beispiel der qualitativen Verbindung .....	49
Abbildung 2-12. Beispiel der Anwendung der abschnittweisen Funktion .....	49
Abbildung 2-13. Graphische Darstellung des Wellenalgorithmus.....	53
Abbildung 2-14. Berechnung des Endeinflusses der Kette .....	53
Abbildung 2-15. Beispiel der Faktorenketten .....	57
Abbildung 2-16. Histogramm der ankommenden Wirkungen. ....	60
Abbildung 2-17. Funktion $y = f(x)$ . ....	60

Abbildung 2-18. Paretodiagramm .....	60
Abbildung 2-19. Kurve der Änderung des Faktorenwertes.....	62
Abbildung 3-1. Architektur des analytischen Systems „Strateg“ .....	66
Abbildung 3-2. Struktur des typisierten Datasets.....	68
Abbildung 3-3. Architektur der Komponente zur Visualisierung der kognitiven Karte .....	71
Abbildung 3-4. Algorithmus der Berichtserstellung .....	73
Abbildung 3-5. Registerkarte Modell.....	74
Abbildung 3-6. Registerkarte Faktoren .....	75
Abbildung 3-7. Unterfenster Faktorenauswirkungen .....	76
Abbildung 3-8. Unterfenster kognitive Karte.....	77
Abbildung 3-9. Unterfenster Auswirkungsmatrix .....	77
Abbildung 3-10. Unterfenster Szenarien – Strategie.....	78
Abbildung 3-11. Unterfenster Szenarien - Aufsichtsfaktoren .....	79
Abbildung 3-12. Unterfenster Szenarien – Ergebnisse .....	79
Abbildung 3-13. Dialog „Bearbeitung des Faktors“ .....	80
Abbildung 3-14. Dialog „Bearbeitung der Auswirkung“ .....	81
Abbildung 3-15. Analyse der Auswirkungen, Pareto-Analyse .....	81
Abbildung 3-16. Kurve der Änderung des Faktorenwertes in der Simulation.....	82
Abbildung 3-17. Visuelle Erkennung der Einflussfaktoren .....	82
Abbildung 3-18. UML-Diagramm der Arbeitsvarianten.....	83
Abbildung 4-1. Gussteil mit Gießsystem (64 S. 55).....	85
Abbildung 4-2. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse der Selbstentwicklung .....	92
Abbildung 4-3. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Gießtemperatur.....	96
Abbildung 4-4. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Kokillentemperatur .....	97
Abbildung 4-5. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Gießzeit .....	99
Abbildung 4-6. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des 1. kombinierten Szenariums ..	101
Abbildung 4-7. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des 2. kombinierten Szenariums ..	103
Abbildung 4-8. Graphische Darstellung der Simulationsergebnisse des Szenariums Kompetenz .....	105

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1. Normen zum Qualitätsmanagement nach DIN EN ISO (3).....	8
Tabelle 1-2. Dimensionen von Problemen und ihre Ausprägungen (21 S. 12).....	21
Tabelle 1-3. Problemtypen (23).....	22
Tabelle 2-1. Linguistische Darstellung der Abstufungen einer Ordinalskala .....	45
Tabelle 2-2. Entscheidungsmatrix .....	63
Tabelle 4-1. Anfangswerte der Legierungseigenschaften .....	86
Tabelle 4-2. Anfangswerte der Gruppe Personal und Anlage .....	86
Tabelle 4-3. Anfangswerte der Gruppe Kokilleneigenschaften .....	87
Tabelle 4-4. Anfangswerte der Eigenschaften des Prozessablaufs.....	88
Tabelle 4-5. Anfangswerte der Gruppe Eigenschaften des Gussstücks .....	89
Tabelle 4-6. Zielfaktoren .....	90
Tabelle 4-7. Simulationsergebnisse der Selbstentwicklung .....	92
Tabelle 4-8. Statistische Daten vom Unternehmen .....	93
Tabelle 4-9. Vergleich der Simulationsergebnisse mit statistischen Daten.....	93
Tabelle 4-10. Steuerung des Szenariums Gießtemperatur.....	95
Tabelle 4-11. Simulationsergebnisse des Szenariums Gießtemperatur.....	95
Tabelle 4-12. Steuerung des Szenariums Kokillentemperatur .....	97
Tabelle 4-13. Simulationsergebnisse des Szenariums Kokillentemperatur.....	97
Tabelle 4-14. Steuerung: Gießzeit.....	98
Tabelle 4-15. Steuerung: Querschnitt des Eingusssystems .....	98
Tabelle 4-16. Simulationsergebnisse des Szenariums Gießzeit .....	99
Tabelle 4-17. Steuerung: Gießtemperatur .....	100
Tabelle 4-18. Steuerung: Kokillentemperatur .....	100
Tabelle 4-19. Steuerung: Gießzeit.....	100
Tabelle 4-20. Steuerung: Querschnitt des Eingusssystems .....	101
Tabelle 4-21. Simulationsergebnisse des 1. kombinierten Szenariums.....	101
Tabelle 4-22. Steuerung: Veredelung.....	102
Tabelle 4-23. Steuerung: Komplexe Schmelzebehandlung.....	102
Tabelle 4-24. Steuerung: Gießzeit.....	102



Tabelle 4-25. Steuerung: Querschnitt des Eingussystems .....	103
Tabelle 4-26. Simulationsergebnisse des 2. kombinierten Szenariums.....	103
Tabelle 4-27. Steuerung: Kompetenz des Personals .....	104
Tabelle 4-28. Simulationsergebnisse des Szenariums Kompetenz .....	105
Tabelle 4-29. Wirksamkeit der Szenarien .....	106
Tabelle 4-30. Anwendung der Maximin-Regel.....	107
Tabelle 4-31. Anwendung der Maximax-Regel .....	107
Tabelle 4-32. Entscheidungsmatrix .....	109
Tabelle 4-33. Minimal mögliche Werte für jeden Gussfehler.....	109
Tabelle 4-34. Bedauern-Matrix .....	109

## Formelverzeichnis

Formel 2-1. Vorbehalt der Linienskalierung .....	44
Formel 2-2. Linienskalierung .....	44
Formel 2-3. Rücktransformation der Linienskalierung .....	44
Formel 2-4. Beispiel einer abschnittweisen Funktion. ....	49
Formel 2-5. Selbstentwicklung, Matrizenform.....	52
Formel 2-6. Gesamt ankommender Impuls. ....	53
Formel 2-7. Gesteuerte Entwicklung, Matrizenform .....	54
Formel 2-8. Summierung der Impulse.....	55
Formel 2-9. Summierung der Impulse.....	55
Formel 2-10. Berechnung des Gesamtimpulses .....	55
Formel 2-11. Transitive Hülle .....	57
Formel 2-12. Wirkung auf den gewählten Faktor .....	57
Formel 2-13. Wirkung des gewählten Faktors .....	57
Formel 2-14. Summierung der Impulse.....	58
Formel 2-15. Summierung der Impulse.....	58
Formel 2-16. Das Risiko der Entscheidungsträger .....	63
Formel 2-17. Maximin-Regel .....	63
Formel 2-18. Maximax-Regel .....	64
Formel 2-19. Savage-Regel .....	64
Formel 2-20. Hurwitz-Regel.....	64

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich die Promotionsordnung der Fakultäten der Technischen Universität Bergakademie Freiberg vom 16. März 2010 in vollem Umfang anerkenne.

1.07.2012,  Polyakova

## Erklärung

Ich erkläre, dass ich keine früheren Promotionsversuche unternommen habe, dass aktuell kein Promotionsverfahren läuft und dass ich keine abgeschlossene Promotion vorzuweisen habe.

1.07.2012,  Polyakova